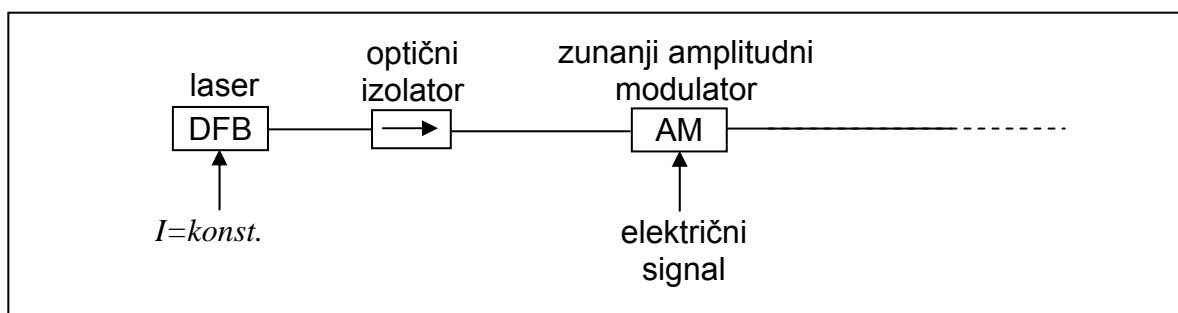


14. Svetlobni modulatorji

Ko je direktna modulacija laserja prepočasna, je potrebno izvesti zunanjo modulacijo s pomočjo zunanjega svetlobnega modulatorja. Zunanja modulacijska tehnika se izogne velikemu drhtenju optičnega signala, ki spremlja hitre direktne modulacijske tehnike, kar pogosto omejuje sistemske prenosne zmožnosti. V dandanašnjih optičnih modulacijah se uporablja amplitudna modulacija, zato si bomo v tem poglavju podrobneje ogledali zunanje amplitudne modulatorje. Zunanje svetlobne modulatorje delimo po izvedbi na:

- Mehanske modulatorje, ki so zasnovani kot zaslone. Največkrat so zelo počasni (1 kHz) in se uporabljajo v meritvah.
- Akustooptične modulatorje, ki izkoriščajo interakcijo svetlobe in zvoka.
- Elektrooptične modulatorje, pri katerih je lomni količnik snovi funkcija modulacijske napetosti $n(U_m)$.
- Elektroapsorpcijske modulatorje, pri katerih se spreminja slabljenje snovi v odvisnosti od modulacijske napetosti $a(U_m)$.



Slika 1: Priključitev zunanjega amplitudnega modulatorja.

14.1. Akustooptični modulator

Akustooptika je področje na meji med akustiko in optiko, ki temelji na akustooptičnem pojavu v snovi, torej na interakciji med zvokom ter svetlobo v snovi.

Pri širjenju akustičnega vala se v snovi pojavljajo napetosti, ki se odražajo kot zgoščine (višji lomni količnik) in razredčine (nižji lomni količnik). Zvočni valovi povzročajo uklon svetlobe v snovi.

Interakcija med zvočnim in svetlobnim valovanjem nastane zaradi krajevno-časovne odvisnosti lomnega količnika, ki jo povzroča zvok in ki lahko bistveno vpliva na širjenje svetlobe skozi snov.

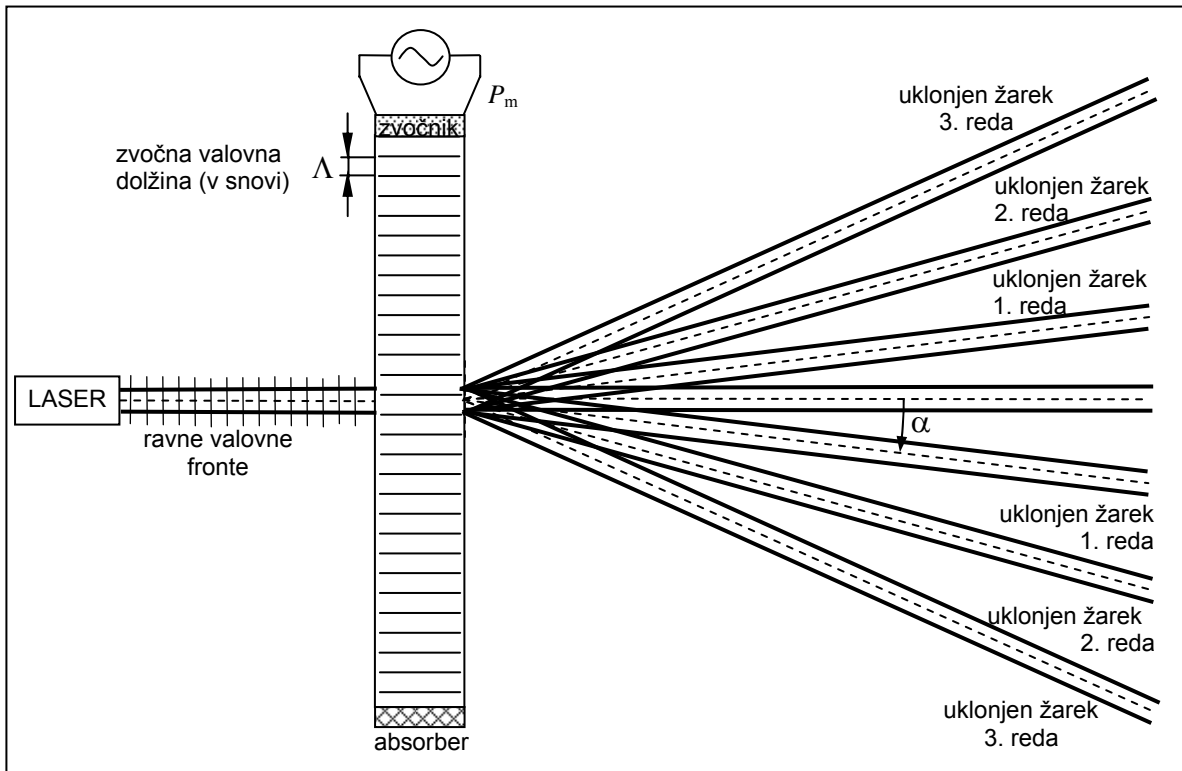
14.1.1. Raman-Nathov uklon svetlobe

Raman-Nathov uklon svetlobe se izvede v zelo ozki Raman-Nathovi celici, ki si jo lahko predstavljamo kot ozko fazno uklonsko mrežico. Po prehodu skozi tako celico postane optično polje fazno modulirano. Podobno kot na amplitudni uklonski mrežici polje po izstopu iz mrežice interferira konstruktivno v smereh, danih z enačbo

$$\sin \alpha_m = m \cdot \frac{\lambda}{\Lambda} \quad (1)$$

Raman-Nathov uklon svetlobe je v plinu zelo majhen in zato mnogo lažje izvedljiv v tekočini ali trdni snovi. V trdni snovi se širi zvok s frekvenco od 100 MHz do 1 GHz, v tekočinah pa s frekvenco od 10 MHz do 100 MHz.

Perioda valovitosti valovne fronte svetlobnega žarka na izhodu iz zvočne celice je odvisna od lomnega količnika zgoščin in razredčin. Moč modulacijskega signala P_m vpliva na nagrbčenost valovnih front, kar pomeni odklon žarka α .



Slika 2: Raman-Nathov uklon svetlobe na zvočnem valovanju.

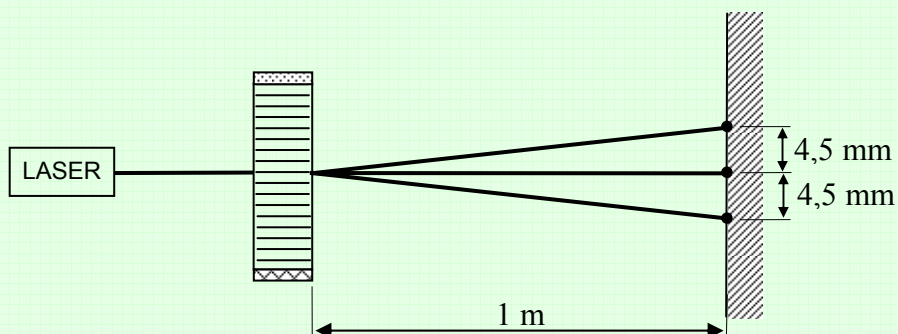
Primer:

V vodi ustvarimo Raman-Nathovo celico s pomočjo zvočnega valovanja s frekvenco $f=10$ MHz. Hitrost zvoka v vodi je $v=1400$ m/s. Izračunaj odklon žarka prvega reda na zaslonu oddaljenem 1 m, če na celico vpadajo rdeča svetloba z valovno dolžino $\lambda=0,633$ μm .

$$\Lambda = \frac{v}{f} = \frac{1400 \text{ m/s}}{10^7 \text{ s}^{-1}} = 140 \mu\text{m} \approx \frac{1}{7} \text{ mm}$$

$$\alpha = \arcsin \frac{\lambda}{\Lambda} \approx \frac{0,633}{140} = 0,0045 \text{ rd} = 4,5 \text{ mrd}$$

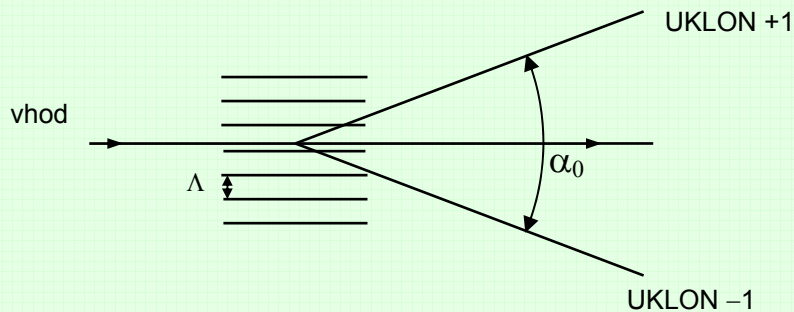
$$\alpha = \frac{0,0045 \text{ rd}}{2\pi} \cdot 360^\circ = 0,25^\circ$$



Akustooptični modulatorji imajo majhno vstavitveno slabljenje, kar pomeni, da se ne grejejo, zato jih uporabljamo pri velikih močeh laserjev (za graviranje).

Primer:

Določite frekvenco zvočnega valovanja v akustooptičnem modulatorju svetlobe, da znaša kot med uklonjenima žarkoma prvega reda $\alpha=1^\circ$ (v zraku)! Hitrost zvočnega valovanja v snovi (steklu) znaša $v=3,5$ km/s, lomni količnik stekla je $n=1,5$, kot izvor svetlobe uporabimo HeNe laser ($\lambda=632,8$ nm).



$$\sin \frac{\alpha_0}{2} = \frac{\lambda_0}{\Lambda} \rightarrow \Lambda = \frac{\lambda_0}{\sin \frac{\alpha_0}{2}} = \frac{632,8 \cdot 10^{-9} \text{ m}}{\sin 0,5^\circ} = \underline{72,5 \mu\text{m}}$$

$$f = \frac{v}{\Lambda} = \frac{3,5 \cdot 10^3 \text{ m/s}}{72,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}} = \underline{\underline{48,3 \text{ MHz}}}$$

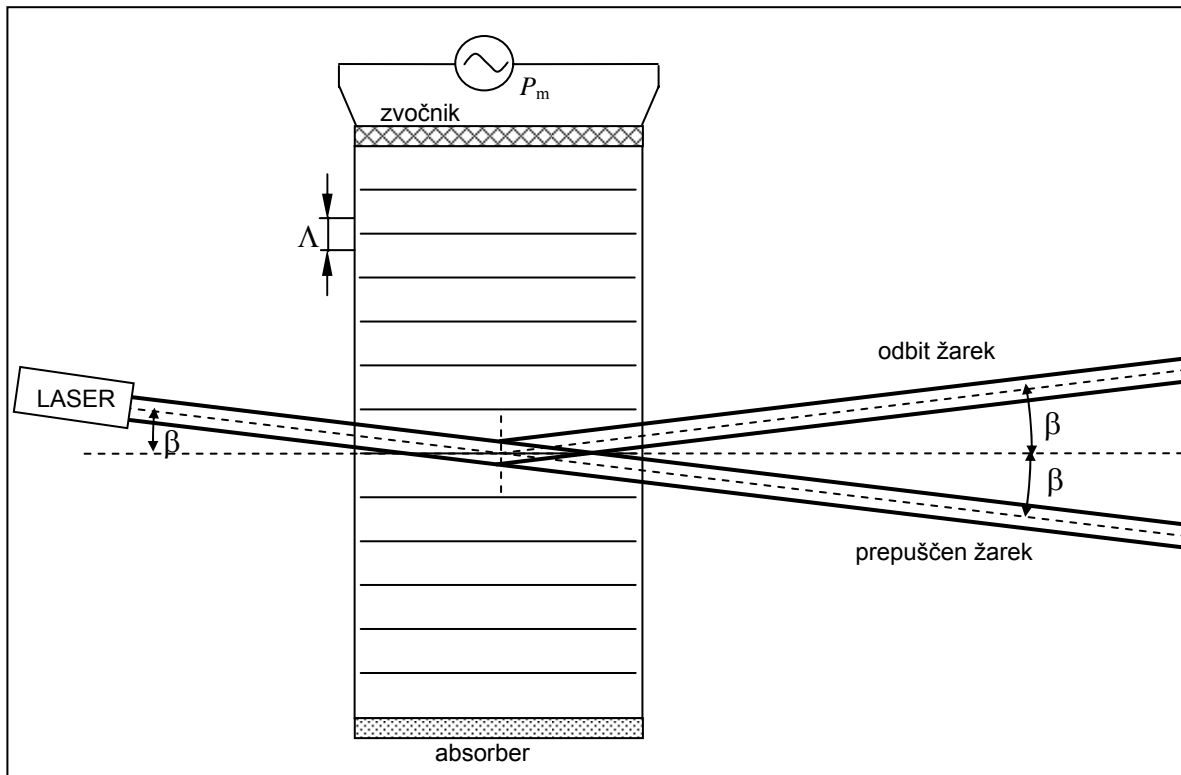
Primer:

Določite hitrost zvočnega valovanja v akustooptičnem modulatorju, če se žarka prvega reda uklonita za kot $\alpha=0,1^\circ$! Kot izvor svetlobe uporabimo rdeči HeNe laser z valovno dolžino $\lambda=632,8$ nm, piezoelektrični pretvornik pa krmilimo z radiofrekvenčnim generatorjem s frekvenco $f=12$ MHz.

$$\sin \alpha = \frac{\lambda}{\Lambda}$$

$$v = \frac{\Lambda}{t} = \Lambda f = \frac{\lambda f}{\sin \alpha} = \frac{632,8 \cdot 10^{-9} \text{ m} \cdot 12 \cdot 10^6 \text{ s}^{-1}}{\sin 0,1^\circ} = \underline{\underline{4351 \text{ m/s}}}$$

14.1.2. Braggov odboj

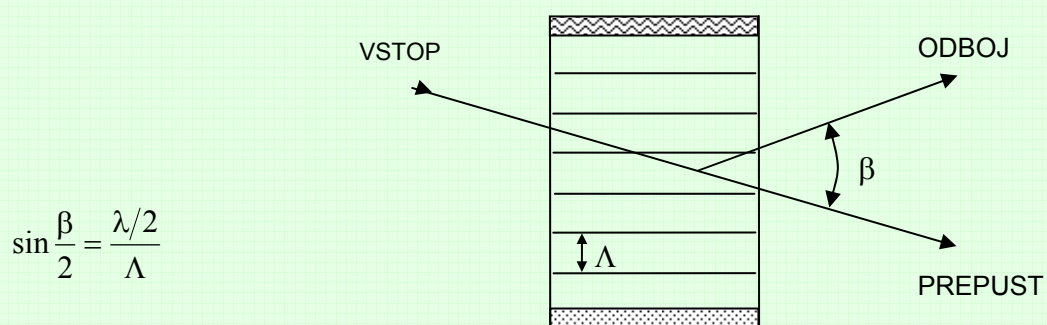


Slika 3: Braggov odboj svetlobe znotraj široke celice.

$$\sin \beta = \frac{\lambda/2}{\Lambda} \quad (2)$$

Primer:

Braggovo akustooptično stikalo uporabimo za modulacijo argonskega laserja na valovni dolžini $\lambda=488 \text{ nm}$. Izračunajte kot odklona žarka β , če modulator krmilimo z električnim signalom frekvence $f_m=100 \text{ MHz}$ in znaša hitrost ultrazvoka v modulatorju $v=4 \text{ km/s}$!



$$\sin \frac{\beta}{2} = \frac{\lambda/2}{\Lambda}$$

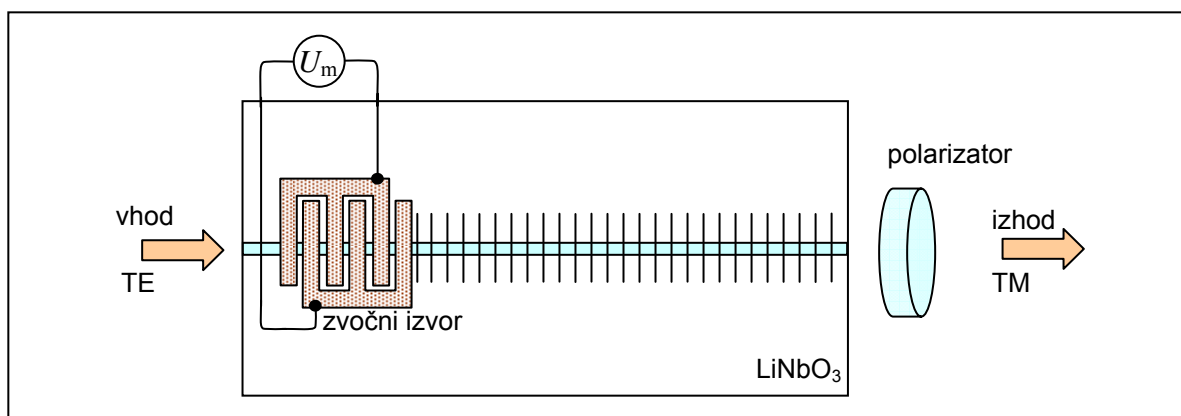
$$\Lambda = \frac{v}{f_m}$$

$$\beta = 2 \arcsin \left(\frac{\lambda f_m}{2v} \right) = \underline{\underline{0,012 \text{ rd} = 0,699^\circ}}$$

14.1.3. Akustooptični filter

Akustooptični filter je izredno prilagodljiva naprava in edini spremenljivi filter, ki lahko obenem izloči več valovnih dolžin. Pri širjenju akustičnega vala se v snovi pojavljajo napetosti katerih posledica je sprememba lomnega količnika snovi. Akustooptični filter je izdelan na LiNbO_3 substratu. Z dopiranjem Ti je izdelan valovod, ki omogoča širjenje samo nižjim rodovom TE in TM valovanja. LiNbO_3 je dvolomni kristal, pri čemer je $n_{\text{TE}}=2,05$ in $n_{\text{TM}}=2,2$.

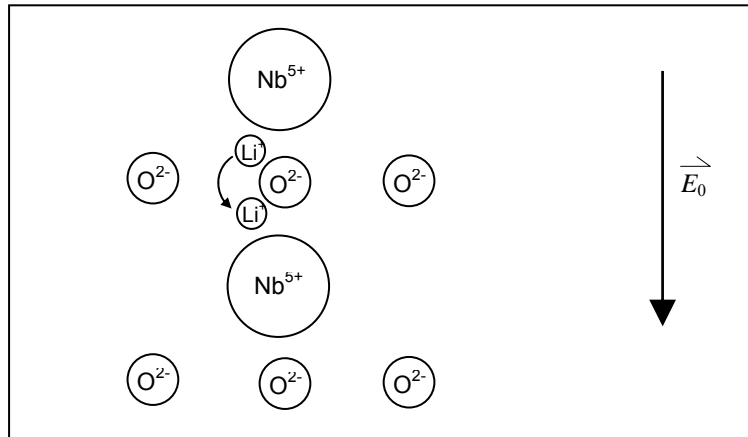
LiNbO_3 ima piezoelektrične lastnosti. Akustično valovanje v valovodu ustvari zgoščine in razredčine v obliki Braggove periodične strukture. Pravimo, da ima akustooptični pojav lastno frekvenčno selektivnost, ki temelji na faznem sinhronizmu. Ko je pogoj faznega sinhronizma porušen, pride do oslabitve izhodnega signala.



Slika 4: Akustooptični filter.

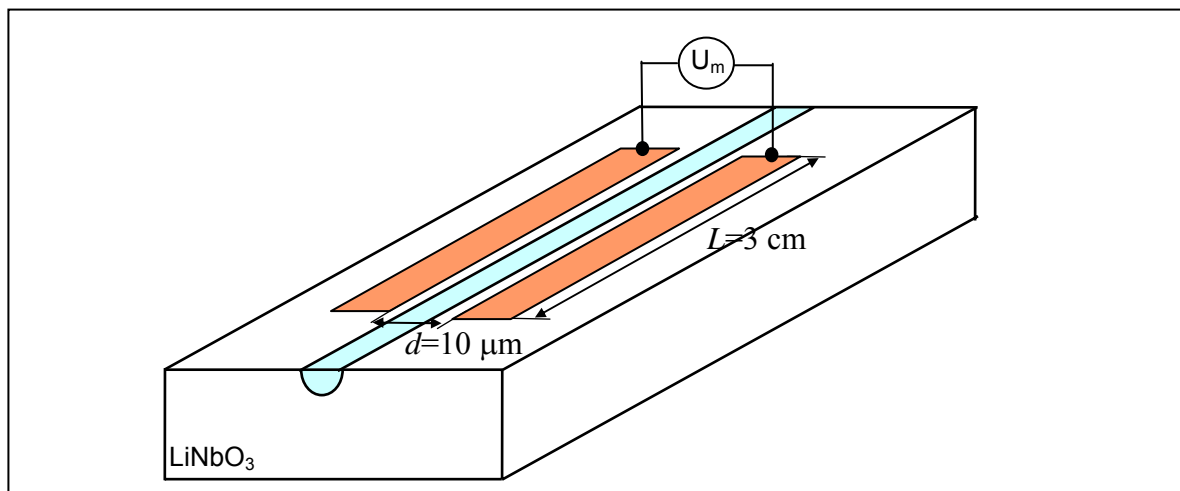
14.2. Elektrooptični modulator

Elektrooptični modulatorji se izdelujejo iz elokrooptičnega materiala, največkrat iz litijevega nijobata LiNbO_3 . Nijobijevi ioni so veliki v primerjavi z ostalimi elementi v kristalu. Litij je majhen atom s samo tremi elektroni in ima možnost dveh stabilnih leg. Na položaj Li atoma lahko vplivamo z zunanjim električnim poljem. LiNbO_3 se lahko naelektri podobno kot se namagnetni feromagnetik.



Slika 5: Kristal LiNbO_3 v električnem polju.

Na tem substratu je valovod izdelan z difuzijo titana, ki poveča lomni količnik. Slabljenje takega svetlovida znaša približno 0,1 dB/cm.



Slika 6: Fazni modulator na LiNbO_3 .

Pod vplivom električnega polja se spremeni lomni količnik.

$$n = n_0 + n_1 E, \quad (1)$$

linearni lomni količnik n_1 znaša $3 \cdot 10^{-11}$ m/V.

Primer:

Vir z modulacijsko napetostjo $U_m = 10$ V priključimo na elektrodi, ki sta razmaknjene za $d = 10$ μm . Za koliko se spremeni lomni količnik LiNbO_3 , če linearni lomni količnik n_1 znaša $3 \cdot 10^{-11}$ m/V.

$$E = \frac{U_m}{d} = \frac{10 \text{ V}}{10 \mu\text{m}} = 10^6 \frac{\text{V}}{\text{m}}$$

$$\Delta n = n_1 \cdot E = 3 \cdot 10^{-11} \frac{\text{m}}{\text{V}} \cdot 10^6 \frac{\text{V}}{\text{m}} = \underline{\underline{3 \cdot 10^{-5}}}$$

Dolžina elektrode L znaša 3 cm. Fazni modulator spremeni fazo optičnega vala za

$$\Delta\varphi = \Delta k \cdot L,$$

(2)

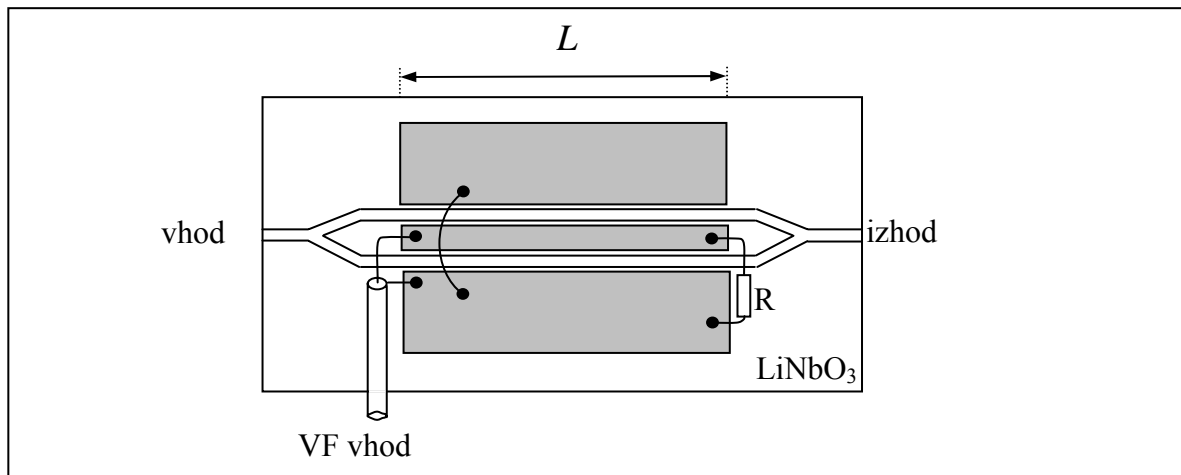
kjer je k konstanta širjenja valovanja.

Primer:

Za koliko se spremeni faza signala, če je elektroda dolga 3 cm?

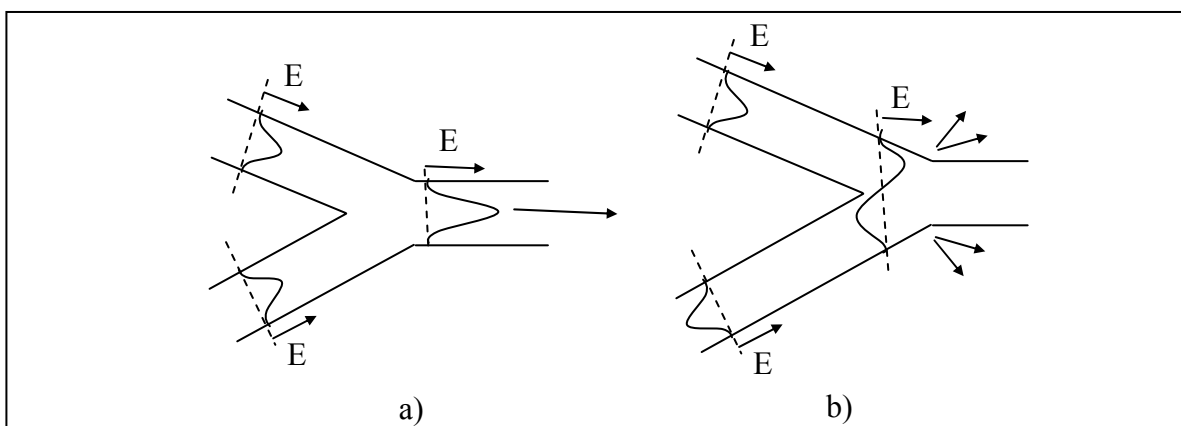
$$\Delta\varphi = \Delta k \cdot L$$

$$\Delta\varphi = \Delta n \cdot k_0 \cdot L = \Delta n \cdot \frac{2\pi}{\lambda_0} \cdot L = 3 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{2\pi \text{ rd}}{1550 \text{ nm}} \cdot 3 \cdot 10^{-2} \text{ m} = \underline{\underline{3,6 \text{ rd} \approx \pi}}$$



Slika 7: Mach-Zehnderjev amplitudni modulator, ki ima fazni modulator v obeh vejah interferometra.

Interferenca izstopnih valov v enorodovnem izhodnem Y sklopniku povzroči amplitudno modulacijo vhodnega optičnega vala. Če sta optični dolžini obeh vej enaki, med potujočima valovodnima rodovoma ni fazne razlike in v izhodnem Y sklopniku konstruktivno interferirata. Če zanemarimo izgube v modulatorju, je izhodna optična moč enaka vhodni. Če se optični dolžini obeh vej tako razlikujeta, da je fazna razlika med optičnima valovodoma enaka $n\pi$, sta na izhodu protifazna. V Y sklopniku in izhodnem valovodu vzbujata antisimetričen rod višjega reda, ki se po enorodovnem valovodu ne more širiti. Vsa optična moč se zato izseva v substrat, moč na izhodu modulatorja pa je enaka nič. Med tema dvema ekstremnima primeroma so možna še vsa vmesna stanja, ki so odvisna od fazne razlike med valovoma v vejah interferometra. Amplitudna modulacija je rezultat interference valovodnih rodov v valovnem Y sklopniku, kot prikazuje slika 8.



Slika 8: a) interferenca sofaznih in b) protifaznih valovodnih rodov v izhodnem planarnem valovodu.

Vzemimo, da je na vhodu Mach-Zehnderjevega amplitudnega modulatorja optični val z amplitudo električne poljske jakosti E_{vh} , ki se v valovodnem delilniku razdeli v dva optična valova amplitud E_1 in E_2 . Zaradi krmiljenja z električnim signalom nastane fazna razlika $\Delta\varphi$ med valovoma v obeh vejah. Električna poljska jakost na izhodu se izračuna s pomočjo vektorske vsote optičnih valov E_1 in E_2 . Kvadrat amplitude izhodne električne poljske jakosti znaša

$$E_{izh}^2 = E_1^2 + E_2^2 - 2E_1E_2 \cos(180^\circ - \Delta\varphi) = E_1^2 + E_2^2 + 2E_1E_2 \cos(\Delta\varphi). \quad (3)$$

Če je delitev vhodne električne poljske jakosti v vhodnem valovodnem delilniku enakovredna

$$E_{vh}/2 = E_1 = E_2, \quad (4)$$

se izraz (3) preoblikuje v

$$E_{izh}^2 = 2E_1^2(1 + \cos(\Delta\varphi)) = 4E_1^2 \cos^2\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right). \quad (5)$$

Če ta izraz zapišemo z vhodno električno poljsko jakostjo, dobimo

$$E_{izh}^2 = \frac{E_{vh}^2}{2}(1 + \cos(\Delta\varphi)) = E_{vh}^2 \cos^2\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right). \quad (6)$$

S krmiljenjem modulatorja se amplituda električne poljske jakosti na izhodu spreminja po kosinusni krivulji med nič in vrednostjo amplitude električne poljske jakosti na vhodu

$$E_{izh} = E_{vh} \cos\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right), \quad (7)$$

kjer je argument $\Delta\varphi$ sorazmeren krmilni napetosti. Pripadajoča izhodna optična moč znaša

$$P_{izh} = |E_{izh}|^2, \quad (8)$$

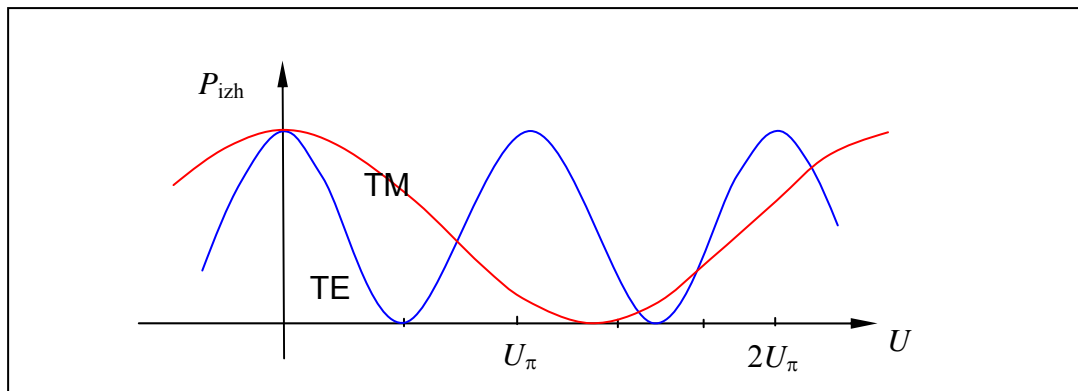
kar preoblikuje izraz (6) v

$$P_{izh} = \frac{P_{vh}}{2}(1 + \cos(\Delta\varphi)) = \frac{P_{vh}}{2} \left(1 + \cos\left(\frac{\pi U}{U_\pi}\right)\right) \quad (9)$$

oziroma

$$P_{izh} = P_{vh} \cos^2\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right) = P_{vh} \cos^2\left(\frac{\pi U}{2U_\pi}\right). \quad (10)$$

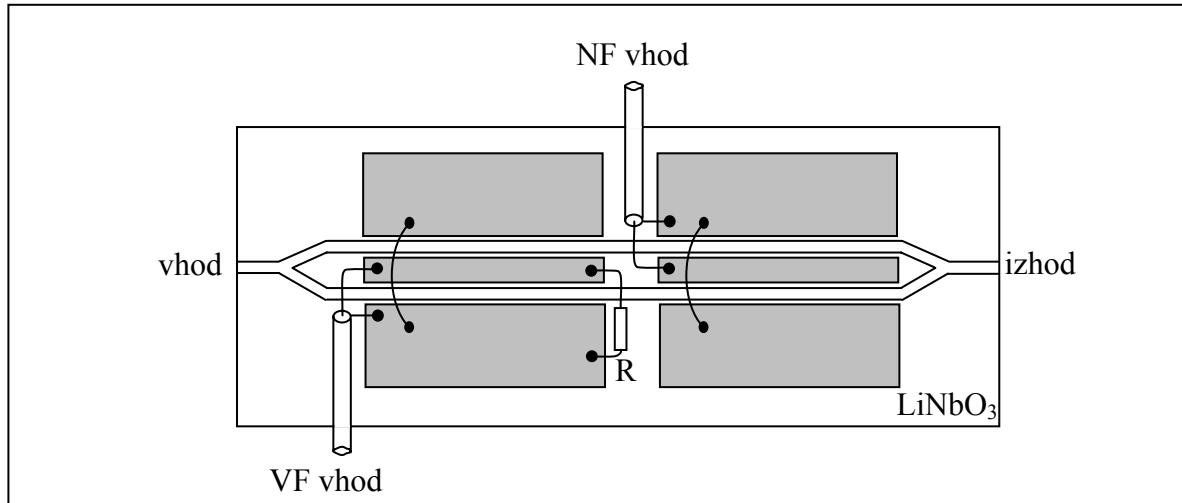
U_π je tista napetost, pri kateri se faza spremeni za π in je odvisna od snovnih in geometrijskih lastnosti Mach-Zehnderjevega modulatorja.



Slika 9: Mach-Zehnderjev amplitudni modulator, ki ima fazni modulator v obeh vejah interferometra.

Ker se sistemi z direktno detekcijo odzivajo na optično gostoto moči, velja Mach-Zehnderjev modulator za nelinearni jakostni modulator. Karakteristiko Mach-Zehnderjevega modulatorja lahko torej zapišemo kot funkcijo dvignjenega kosinusa ali kot kvadrat kosinusa. Oba matematična zapisa sta enakovredna.

Največkrat imajo Mach-Zehnderjevi amplitudni modulatorji dva para krmilnih elektrod, kot prikazuje slika 10. En par elektrod je namenjen krmiljenju z radiofrekvenčnim signalom, zato je oblikovan kot linija z zaključitvenim uporom, ki preprečuje nastanek stojnega vala. Drugi par elektrod služi nastavljanju delovne točke Mach-Zehnderjevega modulatorja ter odpravlja morebitne nesimetričnosti interferometra, zato je brez zaključitvenega upora. Prednost takšne konfiguracije je v tem, da enosmerna napetost, ki služi nastavljanju delovne točke modulatorja, ne segreva zaključitvenega upora in s tem občutljivega LiNbO_3 kristala.

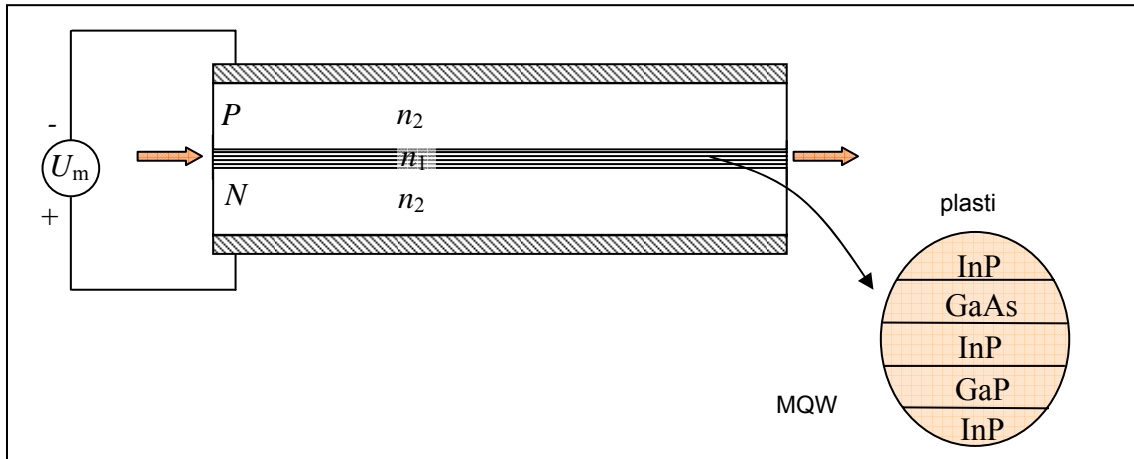


Slika 10: Mach-Zehnderjev amplitudni modulator, ki ima visokofrekvenčni in nizkofrekvenčni vhod.

Ker je kristal LiNbO_3 močno dvolomen, elektrooptični pojav za različne polarizacije vhodnega signala ni enak. Substrat je običajno izrezan iz kristala tako, da je elektrooptični pojav največji za TE polarizacijo. Za TM polarizacijo je za isti učinek potrebna približno trikrat večja krmilna napetost. Zaradi polarizacijske odvisnosti je vhod Mach-Zehnderjevega modulatorja običajno opremljen z vlaknom, ki ohranja polarizacijo.

14.3. Elektroabsorpcijski modulator

Elektroabsorpcija (EA) je pojav, pri katerem se absorpcija snovi pod vplivom električnega polja spremeni. Elektroabsorpcijski modulator je osnovan na Franz-Keldyshovem pojavu v dvojni heterostrukturi ali kvantnemu utesnjenemu Starkovemu pojavu v strukturah z več kvantnimi jamami. Svetloba, katero želimo modulirati, mora imeti takšno valovno dolžino, da je energija njenih fotonov manjša od širine prepovedanega pasu.

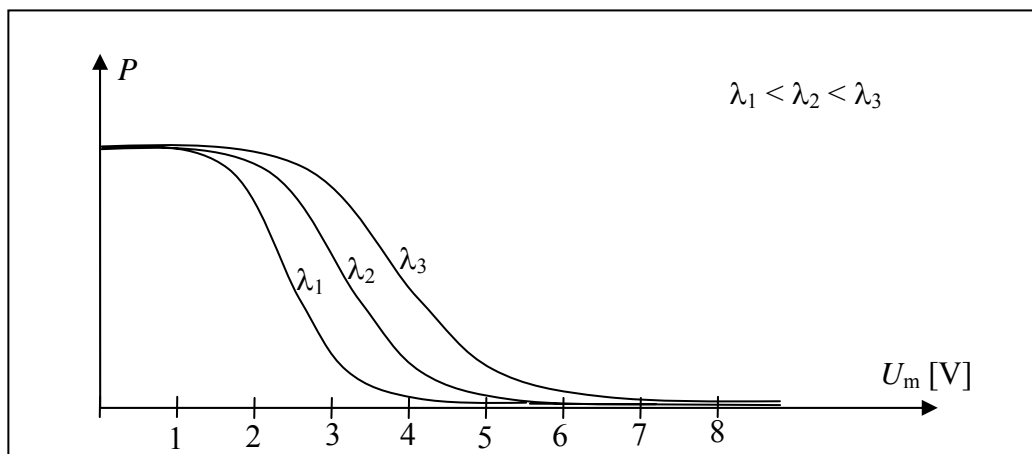


Slika 11: Zgradba elektroabsorpcijskega modulatorja.

Elektroabsorpcijski polprevodniški modulator ima enako zgradbo kot polprevodniški laser, kar omogoča njuno integracijo na isti čip, če sta medsebojno električno izolirana. Glavna razlika med njima je način delovanja. Laser je priključen v prevodni smeri, torej tok teče skozenj, modulator pa je priključen v zaporni smeri, kot, na primer, PIN fotodetektor.

Če na modulator ne priključimo nobene napetosti, je energijski pas velik. Če priključimo napetost, se energijski pas zmanjša, torej se poveča absorpcija.

Modulator je transparenten, ko ni priključen na napetost. Ko pa nanj priključimo napajanje, absorbira svetlobo, ki jo daje laser. Na laser je običajno priključeno konstantno napajanje, medtem ko je modulator krmiljen z vhodnim signalom. Takšni modulatorji so tudi zelo hitri in omogočajo visoke modulacijske frekvence, saj je elektroabsorpcija pojav, ki ni vezan na injekcijo nosilcev naboja zelo hiter pojav.



Slika 12: Absorpcijske krivulje za različne valovne dolžine.

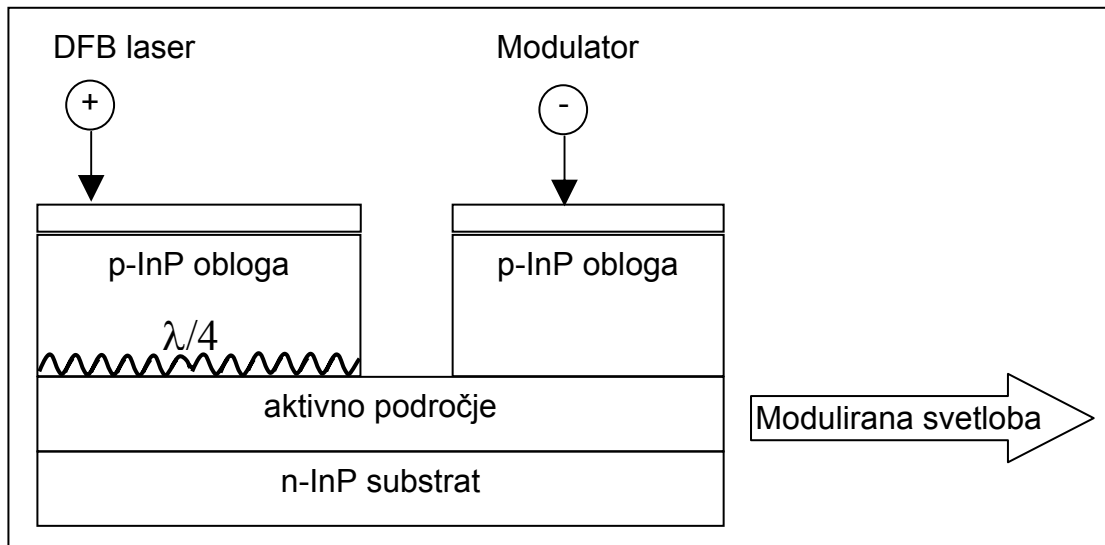
B \approx 30 GHz

Integracija z DFB laserjem

Polarizacijsko neodvisen ($\pm 0,5$ dB)

Polprevodniški laser in modulator nimata identične strukture oziroma aktivne plasti. Najbolje delujeta z rahlo razliko v debelinah in dopiranju. Vseeno sta lahko izdelana na istem substratu, kar olajšuje pakiranje. Elektroabsorpcijski modulator je polarizacijsko odvisen element.

Integriran DFB laser z EA modulatorjem ima izhodno moč 2 mW (iz vlakna). Prednost je majhna potrebna napetost na RF modulacijskem vhodu (3 V). Zgornja modulacijska frekvenca znaša 30 Gb/s.



Prednosti :

- majhen žvižg,
- majhne dimenzije,
- nizko vstavitevno slabljenje.

