

Ljubljana, 2014

ZBIRKA REŠENIH NALOG IZ
OPTIČNIH KOMUNIKACIJ

Laboratorij za sevanje in optiko

Boštjan Batagelj
bostjan.batagelj@fe.uni-lj.si

KAZALO VSEBINE:

1. Sletloba kot elektromagnetno valovanje	str. 1
2. Pravokotni vpad svetlobe na snov	str. 3
3. Vpad svetlobe na snov pod kotom	str. 10
4. Vpad svetlobe na snov pod Brewsterjevim kotom	str. 17
5. Svetlovodi (planarni, krožni)	str. 28
6. Svetlobni sklopi	str. 44
7. Polarizacija	str. 52
8. Polarizacijska disperzija	str. 56
9. Kompenzacija disperzije	str. 57
10. Nelinearnost vlakna	str. 59
11. MCVD	str. 61
12. Spekter laserja	str. 66
13. Temperaturna odvisnost laserja	str. 73
14. Laserji splošno	str. 76
15. Mach-Zehnderjev elektrooptični modulator	str. 84
16. Akustooptika	str. 92
17. Fotodiode	str. 94
18. EDFA	str. 113
19. Optične zveze	str. 116

1. Svetloba kot elektromagnetno valovanje

Svetlobno valovanje z valovno dolžino v vakuumu $\lambda_0=1 \mu\text{m}$ potuje po praznem prostoru s hitrostjo $c_0=3\cdot 10^8 \text{ m/s}$. Koliko znaša hitrost svetlobe v steklu z lomnim količnikom $n=1,5$ in koliko je v tem steklu valovna dolžina?

$$c = \frac{c_0}{n} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{1,5} = \underline{\underline{2 \cdot 10^8 \text{ m/s}}}$$

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{n} = \frac{1 \cdot 10^{-6} \text{ m}}{1,5} = \underline{\underline{0,67 \mu\text{m}}}$$

Koliko je frekvenčni pas Δf optičnega vira s spektralno širino $\Delta\lambda=1 \text{ nm}$ pri valovni dolžini $\lambda_0=1 \mu\text{m}$?

$$|\Delta f| = \frac{c_0}{\lambda_0^2} \cdot |\Delta\lambda| = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{(10^{-6} \text{ m})^2} \cdot |10^{-9} \text{ m}| = \underline{\underline{300 \text{ GHz}}}$$

(V/22/1/03/2)

Izračunajte električno poljsko jakost E v jedru enorodovnega vlakna s polmerom $a=5 \mu\text{m}$ in lomnim količnikom $n_1=1,46$! Po vlaknu prenašamo svetlobno moč $P=10 \text{ mW}$ z valovno dolžino $\lambda=1,55 \mu\text{m}$. Pri računu upoštevamo, da je pretok moči skoraj enakomerno razporejen po preseku jedra vlakna. ($c_0=3\cdot 10^8 \text{ m/s}$, $Z_0=377 \Omega$)

$$S = \frac{P}{\pi a^2} = \underline{\underline{127 \text{ MW/m}^2}}$$

$$Z = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0 \epsilon_r}} = \frac{Z_0}{\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{Z_0}{n_1} = \underline{\underline{258 \Omega}}$$

$$E = \sqrt{2ZS} = \underline{\underline{256 \text{ kV/m}}}$$

(V/19/9/01/2)

Izračunajte največjo dopustno optično moč P_{\max} , ki jo lahko prenašamo preko konektorskega spoja dveh enorodovnih optičnih vlaken s premerom $2a=10 \mu\text{m}$! V konektorskem spoju pride do preboja, ko vršna električna poljska jakost v tanki zračni reži med koncema vlaken doseže vrednost $E_{\max}=2 \cdot 10^6 \text{ V/m}$. Pri računu predpostavimo, da se moč enakomerno porazdeli po preseku jedra optičnega vlakna. ($Z_0=377 \Omega$)

$$S_{\max} = \frac{|E_{\max}|^2}{2Z_0} = \frac{(2 \cdot 10^6 \text{ V/m})^2}{2 \cdot 377 \Omega} = \underline{5,3 \cdot 10^9 \text{ W/m}^2}$$

$$P_{\max} = S_{\max} \cdot A = S_{\max} \cdot \pi a^2 = \underline{\underline{0,417 \text{ W}}}$$

(U/21/6/10/3)

Polprevodniški DFB laser oddaja svetlobno moč $P=10 \text{ mW}$ v okoliški zrak ($n=1$) na valovni dolžini $\lambda=1550 \text{ nm}$. Izračunajte največjo električno poljsko jakost $E_{\max}=?$ V zraku na izhodni ploskvi višine $h=1,5 \mu\text{m}$ in širine $w=10 \mu\text{m}$, če laser niha na enem samem TE rodu. Račun si poenostavimo tako, da privzamemo konstantno osvetlitev celotne izhodne ploskvice. ($c_0=3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$, $Z_0=377 \Omega$, $n_{\text{polprevodnik}}=3,8$)

$$P = \vec{S} \cdot d\vec{A} \approx S \cdot A$$

$$A = h \cdot w = 15 \mu\text{m}^2$$

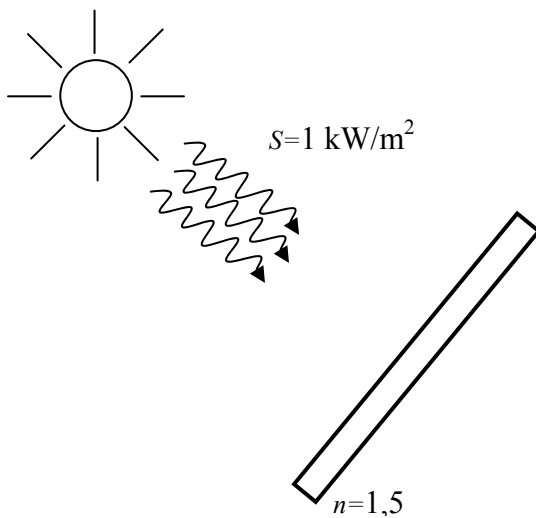
$$S = \frac{|E|^2}{2Z_0} = \frac{|E_{\max}|^2}{2Z_0}$$

$$E_{\max} = \sqrt{\frac{2Z_0 P}{hw}} = \underline{709 \text{ kV/m}}$$

2. Pravokotni vpad svetlobe na snov

(V/9/4/99/1)

Sončna svetloba s pretokom moči $S=1 \text{ kW/m}^2$ vpada pravokotno na steklo z lomnim količnikom $n=1,5$. Izračunajte pretok moči S' v steklu ter velikost vektorja električne poljske jakosti E' v steklu!



$$|\Gamma| = \left| \frac{1-n}{1+n} \right| = \left| \frac{1-1,5}{1+1,5} \right| = \underline{0,2}$$

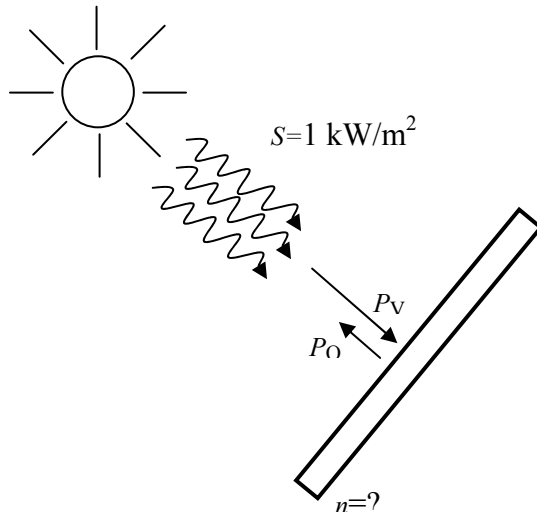
$$S' = S(1 - |\Gamma|^2) = 1000 \text{ W/m}^2 \cdot (1 - 0,04) = \underline{\underline{960 \text{ W/m}^2}}$$

$$Z = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon}} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0} \cdot \frac{1}{n}} = \frac{Z_0}{n}$$

$$E' = \sqrt{2ZS'} = \sqrt{\frac{2Z_0 S'}{n}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 120\pi \Omega \cdot 960 \text{ W/m}^2}{1,5}} = \underline{\underline{695 \text{ V/m}}}$$

(V/15/2/01/1)

Nepolarizirana sončna svetloba vpada iz praznega prostora pod pravim kotom na prozorno snov z neznanim lomnim količnikom n . Določite lomni količnik snovi n , če znaša moč odbitega žarka $P_O=0,02 \cdot P_V$ moči vpadnega žarka!



$$\theta = 0 \rightarrow |\Gamma_{TE}| = |\Gamma_{TM}| = \left| \frac{n-1}{n+1} \right| = |\Gamma|$$

$$\frac{P_O}{P_V} = |\Gamma|^2 \Rightarrow \frac{n-1}{n+1} = \pm \sqrt{\frac{P_O}{P_V}}$$

Rešitev lahko poiščemo, ko vzamemo negativni ali pozitivni predznak.

$$n-1 = -(n+1) \sqrt{\frac{P_O}{P_V}}$$

$$n \left(1 + \sqrt{\frac{P_O}{P_V}} \right) = 1 - \sqrt{\frac{P_O}{P_V}}$$

$$n = \frac{1 - \sqrt{\frac{P_O}{P_V}}}{1 + \sqrt{\frac{P_O}{P_V}}} = \frac{1 - \sqrt{0,02}}{1 + \sqrt{0,02}} = \underline{\underline{0,75}}$$

Tako snov je težko najti.

$$n-1 = (n+1) \sqrt{\frac{P_O}{P_V}}$$

$$n \left(1 - \sqrt{\frac{P_O}{P_V}} \right) = 1 + \sqrt{\frac{P_O}{P_V}}$$

$$n = \frac{1 + \sqrt{\frac{P_O}{P_V}}}{1 - \sqrt{\frac{P_O}{P_V}}} = \frac{1 + \sqrt{0,02}}{1 - \sqrt{0,02}} = \underline{\underline{1,33}}$$

(U/9/9/09/1)

Nepolariziran žarek svetlobe vpada iz zraka ($n=1$) pod pravim kotom na gladko površino velikega bloka dielektrika. Pri tem znaša moč vpadnega žarka $P_V=25$ mW ter moč odbitega žarka $P_O=10$ mW. Kolikšna je relativna dielektričnost bloka ϵ_r ?

$$P_O = P_V |\Gamma|^2 \Rightarrow |\Gamma| = \sqrt{\frac{P_O}{P_V}} = \sqrt{\frac{10 \text{ mW}}{25 \text{ mW}}} = 0,632$$

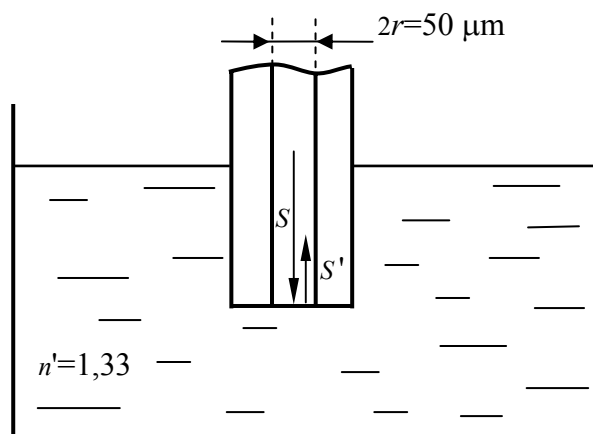
Pravokotni vpad

$$\theta = 0 \rightarrow |\Gamma_{TE}| = |\Gamma_{TM}| = \left| \frac{n-1}{n+1} \right| \Rightarrow n = \frac{1+\Gamma}{1-\Gamma} = \frac{1+0,632}{1-0,632} = 4,442$$

$$n = \sqrt{\epsilon_r} \Rightarrow \epsilon_r = n^2 = \underline{\underline{19,73}}$$

(V/18/6/03/1)

Svetlobno vlakno ima jedro premera $2r=50$ μm z lomnim količnikom $n_1=1,47$ ter oblogo z lomnim količnikom $n_2=1,46$. Izračunajte slabljenje odbitega vala a (v dB) na koncu vlakna, ki je odrezano pod pravim kotom ter potopljeno v tekočino z lomnim količnikom $n'=1,33$ pri valovni dolžini $\lambda=850$ nm!



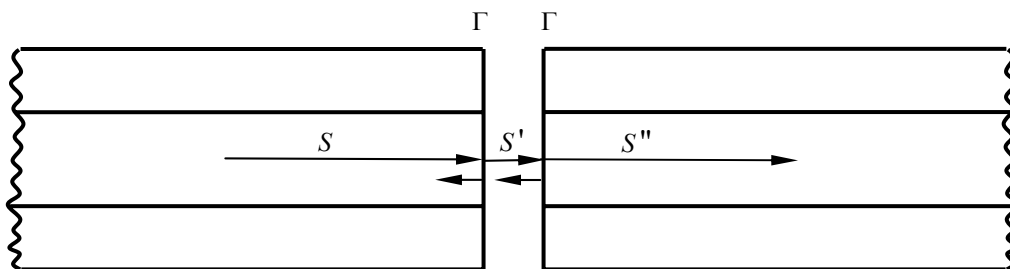
$$\theta_v = 0 \Rightarrow |\Gamma_{TE}| = |\Gamma_{TM}| = \left| \frac{n_1 - n'}{n_1 + n'} \right| = \frac{0,14}{2,80} = \underline{\underline{0,05}}$$

$$S' = S |\Gamma|^2$$

$$a = 10 \log |\Gamma|^2 = \underline{\underline{-26 \text{ dB}}}$$

(V/9/6/99/1)

Določite vstavitveno slabljenje v dB mehanskega spoja dveh mnogorodovnih vlaken, če je med koncema vlaken zračna reža. Zračna reža je dosti ožja od debeline jeder obeh vlaken, do izgub pride v glavnem zaradi odbojev svetlobe na prehodu iz stekla ($n=1,5$) v zrak in nazaj v steklo. Frekvenčni spekter svetlobnega izvora je dovolj širok, da med odbojema ne pride do interference.



$$\theta = 0 \rightarrow |\Gamma_{\text{TE}}| = |\Gamma_{\text{TM}}| = \frac{n-1}{n+1} = \underline{0,2}$$

Po vstopu v zračno režo $S' = S(1 - |\Gamma|^2)$

$$S'' = S'(1 - |\Gamma|^2) = S(1 - |\Gamma|^2)(1 - |\Gamma|^2) = S(1 - 2|\Gamma|^2 + |\Gamma|^4) \approx S(1 - 2|\Gamma|^2)$$

Ker imamo dva odboja brez interference, vzamemo pri izračunu slabljenja dvokratno vrednost kvadrata odbojnosti.

$$a = 10 \log(1 - 2|\Gamma|^2) = 10 \log(1 - 2 \cdot 0,2^2) = \underline{\underline{-0,362 \text{ dB}}}$$

Izračunajte vstavitveno slabljenje (v dB) mehanskega spoja (konektorja) med dvema enakima mnogorodovnimi optičnima vlaknoma s premerom sredice $2r_j=50 \mu\text{m}$ in numerično aperturo $NA=0,21$! Osi vlaken sta sicer poravnani, zaradi nepravilnega vstavljanja konektorjev pa sta konca vlaken vzdolžno razmaknjena za zanemarljivo razdaljo d . Pri izračunu upoštevajte odboj svetlobe na izstopni in vstopni površini vlaken in enakomerno razporeditev svetlobne moči med množico rodov. Frekvenčni spekter svetlobnega izvora je dovolj širok, da med odbojema ne pride do interference. Lomni količnik obloge znaša $n_2=1,470$, za lomni količnik zraka pa vzemimo $n_0=1$.

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad \rightarrow \quad n_1 = \sqrt{NA^2 + n_2^2} = \sqrt{0,21^2 + 1,47^2} = 1,485$$

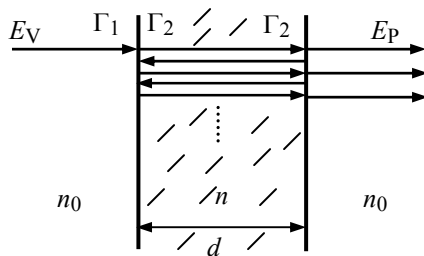
$$|\Gamma_{\text{TE}}| = |\Gamma_{\text{TM}}| = \frac{n_1 - n_0}{n_1 + n_0} = \frac{1,485 - 1}{1,485 + 1} = \underline{0,195}$$

$$a = 10 \log \left(1 - |\Gamma|^2 \right)^2 = 10 \log \left(1 - \left(\frac{n_1 - n_0}{n_1 + n_0} \right)^2 \right)^2 = 10 \log \left(\frac{4n_1 n_0}{(n_1 + n_0)^2} \right)^2 = 10 \log \left(\frac{16n_1^2 n_0^2}{(n_1 + n_0)^4} \right)$$

$$a = 10 \log \left(\frac{16n_1^2}{(n_1 + 1)^4} \right) = 10 \log \left(\frac{16 \cdot 1,485^2}{(1,485 + 1)^4} \right) = \underline{\underline{-0,337 \text{ dB}}}$$

(U/14/9/99/1)

Svetlobni žarek vpadaja pravokotno na stekleno ploščico debeline $d=1$ mm z lomnim količnikom $n=1,5$. Izračunajte najmanjše in največje vstavitveno slabljenje ploščice zaradi interference med odbojema pri vstopu in izstopu svetlobe! Kolikšna je razdalja med maksimumom in minimumom $\Delta\lambda$ za zeleno svetlobo (velikostni razred $\lambda=0,5$ μm)?



$$E_p = E_v (1 + \Gamma_1)(1 + \Gamma_2) e^{-jkd} [1 + \Gamma_2^2 e^{-2jkd} + \Gamma_2^4 e^{-4jkd} + \dots] = E_v \frac{(1 + \Gamma_1)(1 + \Gamma_2) e^{-jkd}}{1 - \Gamma_2^2 e^{-2jkd}}, \text{ kar}$$

dobimo z vsoto geometrijske vrste.

$$\Gamma_1 = \frac{1-n}{1+n} = -0,2 \quad \text{in} \quad \Gamma_2 = \frac{n-1}{n+1} = -\Gamma_1 = +0,2$$

Z upoštevanjem, da je $\Gamma_2 = -\Gamma_1$ dobimo za prepuščeno električno polje izraz

$$E_p = E_v e^{-jkd} \frac{1 - \Gamma_1^2}{1 - \Gamma_1^2 e^{-2jkd}}$$

$$E_{p\max} = E_v e^{-jkd}, \text{ ko je } e^{-2jkd} = 1 \Rightarrow kd = m\pi; d = m \cdot \frac{\lambda}{2}$$

$$E_{p\min} = E_v e^{-jkd} \frac{1 - \Gamma_1^2}{1 + \Gamma_1^2}, \text{ ko je } e^{-2jkd} = -1 \Rightarrow kd = m\pi + \frac{\pi}{2}; d = m \cdot \frac{\lambda}{2} + \frac{\lambda}{4}$$

$$R = 20 \log \left| \frac{E_{p\max}}{E_{p\min}} \right| = 20 \log \frac{1 + \Gamma_1^2}{1 - \Gamma_1^2} = \underline{\underline{0,695 \text{ dB}}}$$

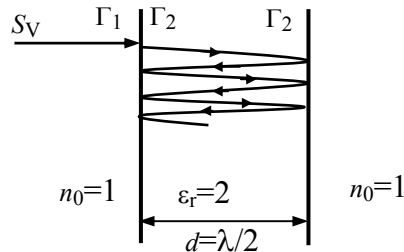
$$\lambda_0 = n\lambda \quad m = \text{int} \left[\frac{2dn}{\lambda_0} \right] = 6000$$

$$\lambda_{\max} = \frac{2dn}{m} = 500 \text{ nm} \quad \lambda_{\min} = \frac{4dn}{2m+1} = 499,958 \text{ nm}$$

$$\Delta\lambda = \lambda_{\max} - \lambda_{\min} = \underline{\underline{0,042 \text{ nm}}}$$

(U/20/9/00/1)

Ravninski val z gostoto moči $S_V=1 \text{ kW/m}^2$ se širi v smeri osi z in pravokotno vpada na dielektrično ploščo ($\epsilon_r=2$) debeline $d=\lambda/2$ (valovna dolžina v dielektriku). Izračunajte Poynting-ov vektor S (realno in imaginarno komponento) v notranjosti plošče!



$$E_V = \sqrt{2Z_0 S_V} = \underline{868 \text{ V/m}}$$

$$n = \sqrt{\epsilon_r} = \underline{1,414}$$

$$\Gamma_1 = \frac{1-n}{1+n} = \underline{-0,172} \quad \Gamma_2 = -\Gamma_1 = \underline{+0,172}$$

$$E_+ = E_V(1+\Gamma_1)e^{-jkz} \left[1 + \Gamma_2^2 e^{-j2kd} + \Gamma_2^4 e^{-j4kd} + \Gamma_2^6 e^{-j6kd} + \dots \right] = \frac{E_V(1+\Gamma_1)e^{-jkz}}{1-\Gamma_2^2 e^{-j2kd}} = \frac{E_V(1+\Gamma_1)e^{-jkz}}{1-\Gamma_2^2}$$

$$E_- = \frac{E_V(1+\Gamma_1)}{1-\Gamma_2^2} \Gamma_2 e^{-2jkd} e^{+jkz} = \frac{E_V(1+\Gamma_1)\Gamma_2}{1-\Gamma_2^2} e^{+jkz}$$

V obeh zgornjih računih je e^{-2jkd} enako ena, zaradi izbrane debeline ploščice, ki določa da je $kd = \pi$.

$$H_+ = \frac{E_+}{Z} \quad H_- = -\frac{E_-}{Z}$$

$$S = \frac{1}{2}(E_+ + E_-)(H_+ + H_-)^* = \frac{1}{2} \left[\frac{E_V(1+\Gamma_1)}{1-\Gamma_2^2} \right]^2 (e^{-jkz} + \Gamma_2 e^{+jkz})(e^{+jkz} - \Gamma_2 e^{-jkz}) \frac{1}{Z}$$

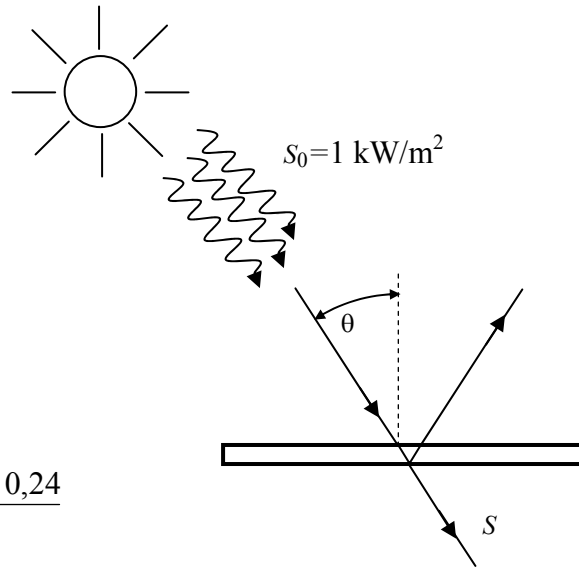
$$S = \frac{\sqrt{\epsilon_r}}{2Z_0} \left[\frac{E_V(1+\Gamma_1)}{1-\Gamma_2^2} \right]^2 (1-\Gamma_2^2 + 2j\Gamma_2 \sin(2kz)) = \frac{E_V^2}{2Z_0} \sqrt{\epsilon_r} \left(\frac{1+\Gamma_1}{1-\Gamma_1} - j \frac{2\Gamma_1}{(1-\Gamma_1)^2} \sin 2kz \right)$$

$$S = S_V \left(1 - j \frac{2\Gamma_1}{1-\Gamma_1^2} \sin 2kz \right) = \underline{(1 + j0,354 \sin 2kz) \text{ kW/m}^2}$$

3. Vpad svetlobe na snov pod kotom

(U/23/9/98/1)

Sončna svetloba z gostoto pretoka moči $S_0=1 \text{ kW/m}^2$ vpada na okno pod kotom $\theta=30^\circ$ od navpičnice. Izračunajte gostoto pretoka prepuščene svetlobe skozi okno S . Upoštevajte samo odboj svetlobe na prednji in zadnji površini okenskega stekla z lomnim količnikom $n=1,5$ za obe polarizaciji!



$$\Gamma_{\text{TE}} = \frac{\cos\theta - \sqrt{n^2 - \sin^2\theta}}{\cos\theta + \sqrt{n^2 - \sin^2\theta}} = \underline{-0,24}$$

$$\Gamma_{\text{TM}} = \frac{n^2 \cos\theta - \sqrt{n^2 - \sin^2\theta}}{n^2 \cos\theta + \sqrt{n^2 - \sin^2\theta}} = \underline{0,16}$$

Nepolarizirana svetloba $S_0=1 \text{ kW/m}^2$, $S_{\text{0TE}} = \frac{1}{2} S_0 = \underline{500 \text{ W/m}^2}$; $S_{\text{0TM}} = \frac{1}{2} S_0 = \underline{500 \text{ W/m}^2}$

Debelina stekla \gg vzdolžne koherenčne dolžine \rightarrow seštevamo moči odbojev

$|\Gamma_{\text{TE}}|^2 \ll 1$ in $|\Gamma_{\text{TM}}|^2 \ll 1 \rightarrow$ odboje višjih redov zanemarimo

Ker imamo odboj iz zraka v steklo in potem iz stekla v zrak moremo upoštevati dva odboja.

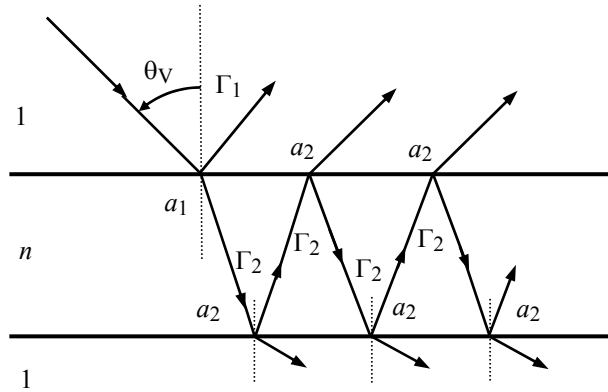
$$S_{\text{TE}} = S_{\text{0TE}} (1 - |\Gamma_{\text{TE}}|^2)^2 = \underline{444 \text{ W/m}^2}$$

$$S_{\text{TM}} = S_{\text{0TM}} (1 - |\Gamma_{\text{TM}}|^2)^2 = \underline{475 \text{ W/m}^2}$$

$$S = S_{\text{TE}} + S_{\text{TM}} = \underline{\underline{919 \text{ W/m}^2}}$$

(V/20/9/00/1)

Svetlobni žarek vpada pod kotom $\theta_v=45^\circ$ na debelo stekleno ploščo ($n=1,5$) in se v plošči večkrat odbije od obeh ploskev. Določite število odbojev N , ko lahko vse naslednje odboje zanemarimo, ker so šibkejši kot $a=-40$ dB od moči vpadnega žarka.



$$\sin \theta_v = \cos \theta_v = \frac{1}{\sqrt{2}}$$

$$\Gamma_{1TE} = \frac{\cos \theta_v - \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_v}}{\cos \theta_v + \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_v}} = \underline{-0,303}$$

$$\Gamma_{1TM} = \frac{n^2 \cos \theta_v - \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_v}}{n^2 \cos \theta_v + \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_v}} = \underline{0,092}$$

$$\Gamma_{2TE} = -\Gamma_{1TE} = \underline{0,303}$$

$$\Gamma_{2TM} = -\Gamma_{1TM} = \underline{-0,092}$$

$$a_{1TE} = 10 \log(1 - |\Gamma_{1TE}|^2) = \underline{-0,419 \text{ dB}}$$

$$a_{1TM} = 10 \log(1 - |\Gamma_{1TM}|^2) = \underline{-0,037 \text{ dB}}$$

$$a_{2TE} = 10 \log|\Gamma_{2TE}|^2 = \underline{-10,361 \text{ dB}}$$

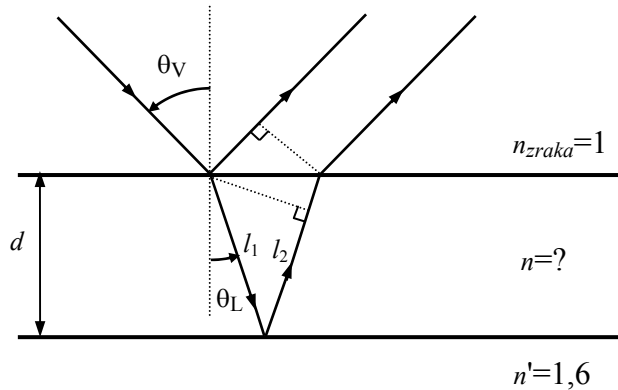
$$a_{2TM} = 10 \log|\Gamma_{2TM}|^2 = \underline{-20,723 \text{ dB}}$$

$$\underline{\underline{N_{TE} = 4 \text{ odboji}}}$$

$$\underline{\underline{N_{TM} = 2 \text{ odboja}}}$$

(V/14/3/03/1)

Izračunajte debelino d in lomni količnik n antirefleksnega sloja, ki ga naneseemo na ravno površino stekla z lomnim količnikom $n'=1,6$! Antirefleksni sloj izdelamo za vidno svetlobo z osrednjo valovno dolžino $\lambda=0,5 \mu\text{m}$, ki vpada pod kotom $\theta_v=30^\circ$ iz praznega prostora na površino stekla.



Jakostni pogoj pri antirefleksnem odboju narekuje, da morata biti odbojnost iz zraka v antirefleksni sloj enaka odbojnosti iz stekla v antirefleksni sloj.

$$\Gamma_{\text{zraka, AR}} = \Gamma_{\text{steklo, AR}}$$

Iz tega pogoja sledi, da je lomni količnik antirefleksnega sloja enak korenu produkta lomnega količnika zraka in lomnega količnika stekla. Ker vzamemo za lomni količnik zraka vrednost ena, je iskani lomni količnik antirefleksnega sloja enak

$$n = \sqrt{n'} = \underline{\underline{1,265}}.$$

$$\Delta l = l_1 + l_2 = \frac{d}{\cos \theta_L} + \frac{d}{\cos \theta_L} \cos 2\theta_L = \frac{d}{\cos \theta_L} (1 + \cos 2\theta_L) = 2d \cos \theta_L$$

Fazni pogoj pri antirefleksnem odboju narekuje $\Delta l = 2d \cos \theta_L = \frac{\lambda/2}{n}$.

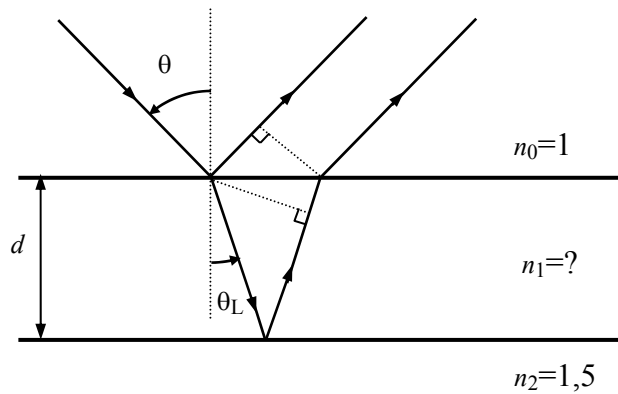
Iz Snell-ovega lomnega zakona med praznim prostorom in antirefleksnim slojem dobimo

$$\sin \theta_L = \frac{\sin \theta_v}{n}.$$

$$d = \frac{\lambda}{4n \cos \theta_L} = \frac{\lambda}{4n \sqrt{1 - \left(\frac{\sin \theta_v}{n}\right)^2}} = \frac{\lambda}{4\sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_v}} = \underline{\underline{108 \text{ nm}}}$$

(U/18/12/98/1)

Izračunajte zahteve za antirefleksni sloj (debelino d in lomni količnik n_1), ki ga naneseemo na površino stekla z lomnim količnikom $n_2=1,5$! Za antirefleksni sloj zahtevamo, da odboj svetlobe izgine pri pravokotnem vpadu svetlobe z valovno dolžino $\lambda=623,8$ nm v praznem prostoru ($n_0=1$).



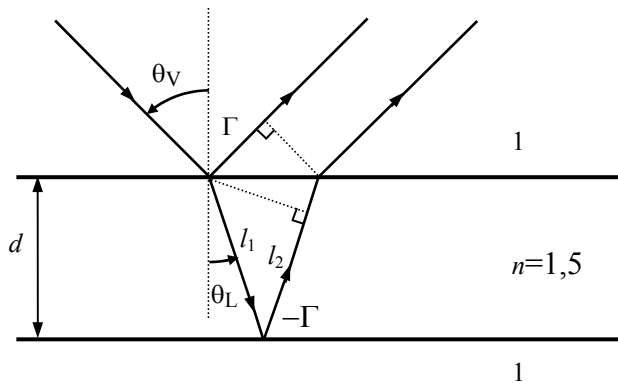
$$n_1 = \sqrt{n_0 n_2} = \sqrt{1 \cdot 1,5} = \sqrt{1,5} = \underline{\underline{1,22}}$$

$$d = \frac{\lambda_1}{4} = \frac{\lambda_0}{4n_1} = \frac{623,8 \text{ nm}}{4 \cdot 1,22} = \underline{\underline{127,33 \text{ nm}}}$$

(Glej naprimer "Vaje iz teorije elektromagnetike", stran 203, vaja 209.)

(U/14/3/03/1)

Nepolariziran svetlobni žarek z valovno dolžino $\lambda=0,6 \mu\text{m}$ vpada iz praznega prostora na površino $d=1 \mu\text{m}$ debele prozorne opne z lomnim količnikom $n=1,5$. Pri katerem vpadnem kotu θ_V doseže moč odbitega žarka najnižjo vrednost? Koliko rešitev ima naloga?



Lomljeni žarek opravi za Δl daljšo pot kot odbiti žarek.

$$\Delta l = l_1 + l_2 = \frac{d}{\cos \theta_L} + \frac{d}{\cos \theta_L} \cos 2\theta_L = \frac{d}{\cos \theta_L} (1 + \cos 2\theta_L) = 2d \cos \theta_L$$

$$\Delta l = 2d \cos \theta_L = m \frac{\lambda}{n}$$

$$m = \frac{2dn \cos \theta_L}{\lambda}$$

Ko je kot lomljenega žarka $\theta_L = 0^\circ \Rightarrow \cos \theta_L = 1$

$$m_{\max} = \text{int}\left(\frac{2dn}{\lambda}\right) = \text{int}(5) = \underline{\underline{5}}$$

Ko je kot lomljenega žarka $\theta_L = 90^\circ \Rightarrow \sin \theta_L = 1$

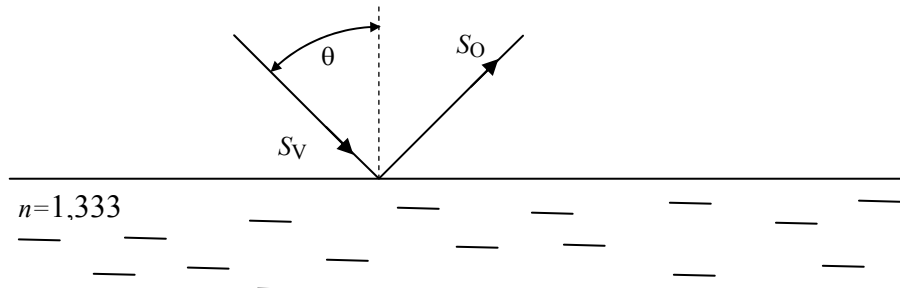
$$m_{\min} = \text{int}\left(\frac{2dn}{\lambda} \sqrt{1 - \sin^2 \theta_{L\max}}\right) + 1 = \text{int}\left(\frac{2d}{\lambda} \sqrt{n^2 - 1}\right) + 1 = \text{int}(3,727) + 1 = \underline{\underline{4}}$$

naloga ima 2 rešitvi: $m=4; 5$

$$\theta_V = \arcsin\left(n \sqrt{1 - \left(\frac{m\lambda}{2dn}\right)^2}\right) = \underline{\underline{64,16^\circ; 0^\circ}}$$

(U/5/7/00/1)

Pokončno polarizirano valovanje vпада na gladino tekočine z lomnim količnikom $n=1,333$. Izračunajte vpadni kot valovanja, ko znaša moč odbitega žarka 1% moči vpadnega žarka! Poiščite vse rešitve naloge!



$$a = 1\% = |\Gamma|^2 \rightarrow \Gamma = \pm 0,1$$

$$\Gamma_{\text{TM}} = \frac{n^2 \cos \theta - \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}}{n^2 \cos \theta + \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}}$$

$$(1 + \Gamma)\sqrt{n^2 - \sin^2 \theta} = (1 - \Gamma)n^2 \cos \theta$$

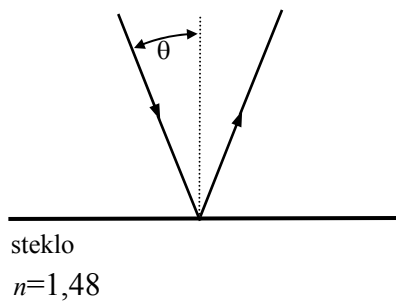
$$(1 + \Gamma)^2 (n^2 - \sin^2 \theta) = (1 - \Gamma)^2 n^4 (1 - \sin^2 \theta)$$

$$[(1 - \Gamma)^2 n^4 - (1 + \Gamma)^2] \sin^2 \theta = (1 - \Gamma)^2 n^4 - (1 + \Gamma)^2 n^2$$

$$\theta = \arcsin \sqrt{\frac{(1 - \Gamma)^2 n^4 - (1 + \Gamma)^2 n^2}{(1 - \Gamma)^2 n^4 - (1 + \Gamma)^2}} = \arcsin(0,55; 0,89) = \underline{\underline{33,4^\circ; 62,8^\circ}}$$

(U/19/12/03/1)

Rdeč žarek nepolariziranega HeNe laserja z valovno dolžino $\lambda=632,8$ nm vpada pod kotom $\theta=15^\circ$ iz praznega prostora na stekleno ploščico z lomnim količnikom $n=1,48$. Izračunajte v kolikšnem območju Δ (v dB) se lahko spreminja jakost odbitega žarka, če se polarizacija laserja naključno spreminja, njegova povprečna izhodna moč pa ostane konstantna!



$$\Gamma_{\text{TE}} = \frac{\cos \theta - \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}}{\cos \theta + \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}} = \underline{-0,2027}$$

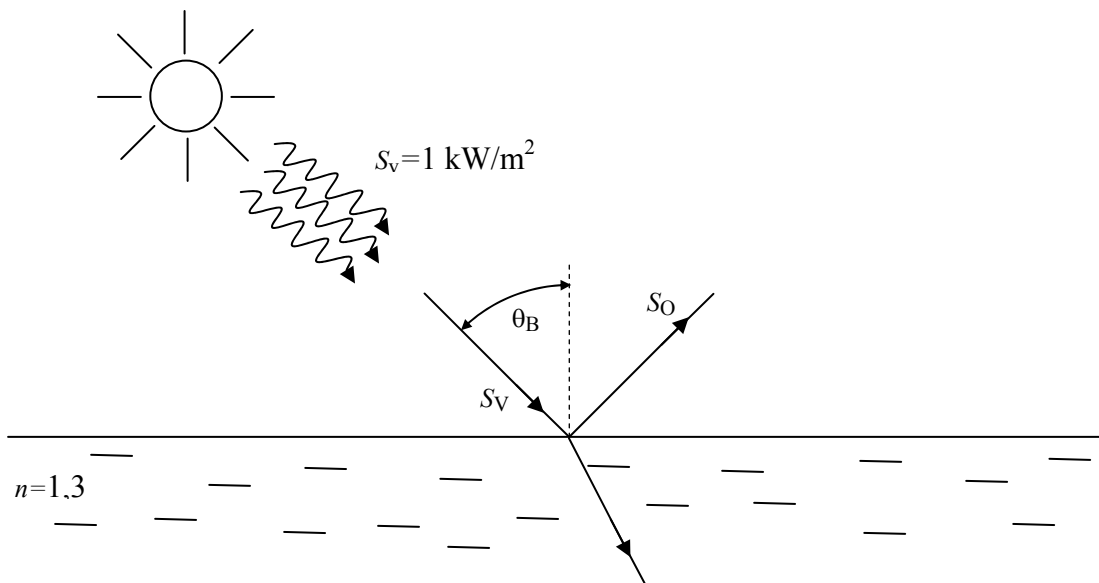
$$\Gamma_{\text{TM}} = \frac{n^2 \cos \theta - \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}}{n^2 \cos \theta + \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}} = \underline{0,1843}$$

$$\Delta a_{\text{dB}} = 20 \cdot \log \left| \frac{\Gamma_{\text{TE}}}{\Gamma_{\text{TM}}} \right| = 20 \cdot \log \left| \frac{\cos \theta - \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}}{n^2 \cos \theta - \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}} \right| = \underline{\underline{0,827 \text{ dB}}}$$

4. Vpad svetlobe na snov pod Brewsterjevim kotom

(U/24/3/00/1)

Nepolarizirana sončna svetloba z gostoto moči $S_V=1 \text{ kW/m}^2$ vpada pod Brewster-jevim kotom na gladino tekočine z lomnim količnikom $n=1,3$. Določite gostoto moči odbite svetlobe S_O v praznem prostoru nad tekočino!



Najprej določimo Brewster-jev kot iz izraza za odbojnost TM komponente valovanja, ki je nič.

$$\Gamma_{\text{TM}} = \frac{n^2 \cos \theta_B - \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_B}}{n^2 \cos \theta_B + \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_B}} = 0$$

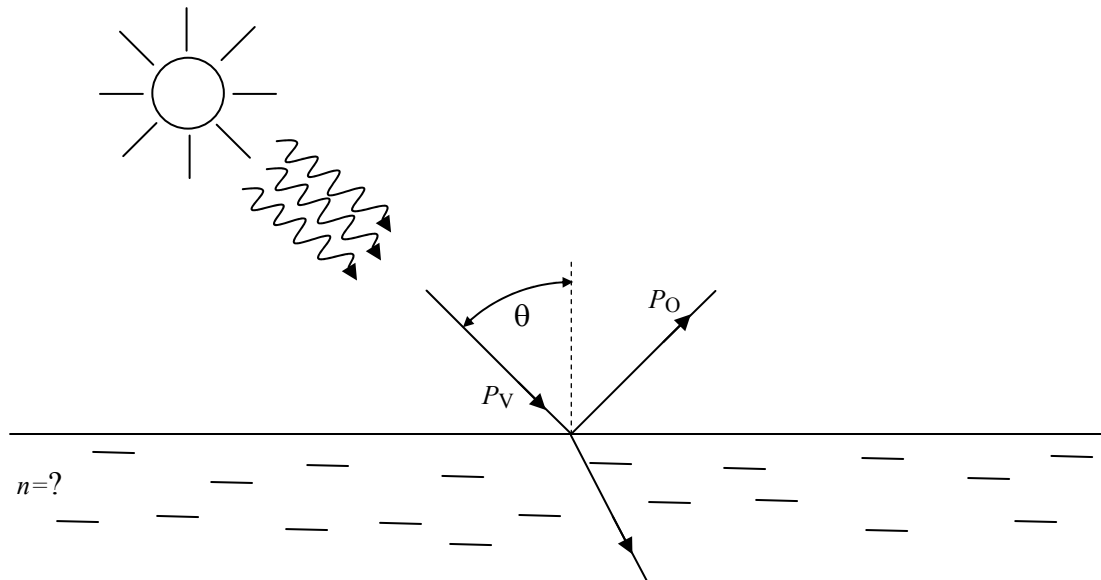
$$\theta_B = \arctg n = \underline{0,915 \text{ rd}}$$

$$\Gamma_{\text{TE}} = \frac{\cos \theta_B - \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_B}}{\cos \theta_B + \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_B}} = \underline{-0,2565}$$

$$S_O = \frac{S_V}{2} \cdot |\Gamma_{\text{TE}}|^2 + \frac{S_V}{2} |\Gamma_{\text{TM}}|^2 = \frac{1}{2} S_V |\Gamma_{\text{TE}}|^2 = \frac{1}{2} \cdot 1 \text{ kW/m}^2 \cdot |-0,2565|^2 = \underline{\underline{32,9 \text{ W/m}^2}}$$

(U/15/6/04/1)

Nepolarizirana sončna svetloba vpada pod kotom 60° iz praznega prostora na gladino tekočine. Izračunajte lomni količnik tekočine n , če postane odbiti žarek popolnoma polariziran. Kolikšen delež moči nepolariziranega vpadnega žarka P_O/P_V se tedaj odbije od gladine tekočine?



Ker je žarek po odboju popolnoma polariziran, je vpadel pod Brewster-jevim kotom.

$$n = \operatorname{tg} \theta_B = \operatorname{tg} 60^\circ = \sqrt{3} = \underline{1,732}$$

$$\Gamma_{\text{TM}} = \frac{n^2 \cos \theta_B - \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_B}}{n^2 \cos \theta_B + \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_B}} = 0$$

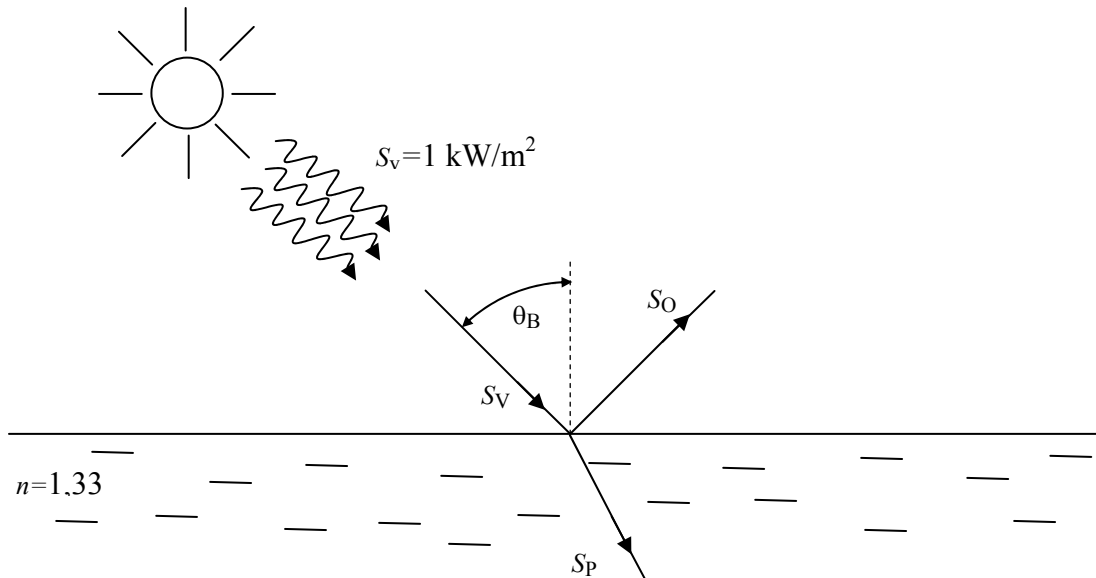
$$\Gamma_{\text{TE}} = \frac{\cos \theta_B - \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_B}}{\cos \theta_B + \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_B}} = \frac{1 - \sqrt{n^2(n^2 + 1) - n^2}}{1 + \sqrt{n^2(n^2 + 1) - n^2}} = \frac{1 - n^2}{1 + n^2} = \underline{-0,5}$$

$$S_O = S_V \frac{|\Gamma_{\text{TE}}|^2 + |\Gamma_{\text{TM}}|^2}{2} = \frac{1}{2} S_V |\Gamma_{\text{TE}}|^2$$

$$\frac{P_O}{P_V} = \frac{1}{2} \cdot |\Gamma_{\text{TE}}|^2 = \frac{1}{2} \cdot |-0,5|^2 = \frac{1}{2} \cdot |0,25| = 0,125 = \underline{\underline{12,5\%}}$$

(05/09/12)

Nepolarizirana sončna svetloba z gostoto pretoka moči $S_V=1 \text{ kW/m}^2$ vpada pod Brewster-jevim kotom na vodno gladino z lomnim količnikom $n=1,33$. Izračunajte gostoto moči prepuščene svetlobe S_P !



Najprej določimo Brewster-jev kot

$$\theta_B = \arctg n = \arctg 1,33 = 0,926 \text{ rd} = 53,06^\circ$$

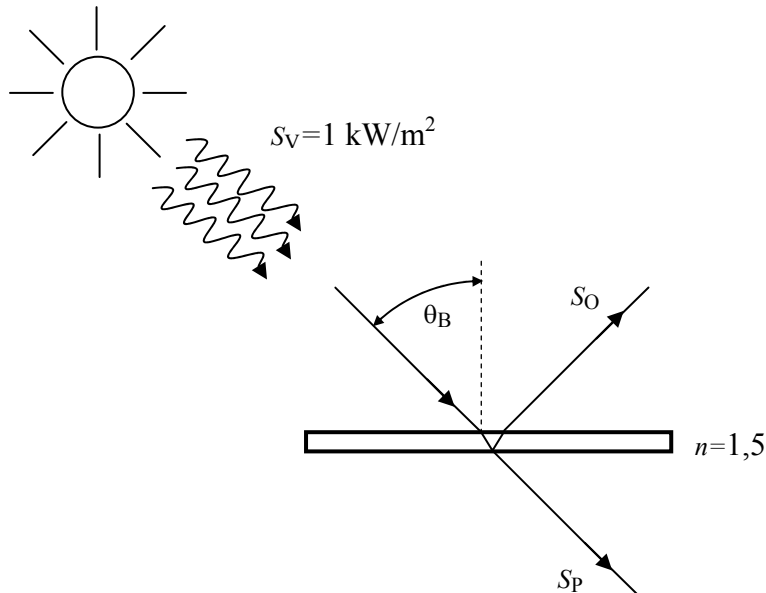
Odbojnost za TM komponento znaša nič, medtem ko je odbojnost TE komponente

$$\Gamma_{TE} = \frac{\cos \theta_B - \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_B}}{\cos \theta_B + \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_B}} = -0,278$$

$$S_P = S_V \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2} (1 - |\Gamma_{TE}|^2) \right) = 1 \text{ kW/m}^2 \cdot \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cdot 0,923^2 \right) = \underline{\underline{961 \text{ W/m}^2}}$$

(V/1/2//00/1)

Nepolarizirana sončna svetloba z gostoto moči $S_V=1 \text{ kW/m}^2$ vpada pod Brewsterjevim kotom iz praznega prostora na površino stekla ($n=1,5$). Določite gostoto moči odbite svetlobe S_O v praznem prostoru!



Za valovanje, ki vpada pod Brewster-jevim kotom, je odbojnost TM komponente nič.

$$\Gamma_{\text{TM}} = \frac{n^2 \cos \theta_B - \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_B}}{n^2 \cos \theta_B + \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_B}} = 0 \rightarrow n^4 \cos^2 \theta_B = n^2 - \sin^2 \theta_B \rightarrow (n^4 - 1) \cos^2 \theta_B = n^2 - 1$$

Iz česar sledi

$$\cos \theta_B = \frac{1}{\sqrt{n^2 + 1}}$$

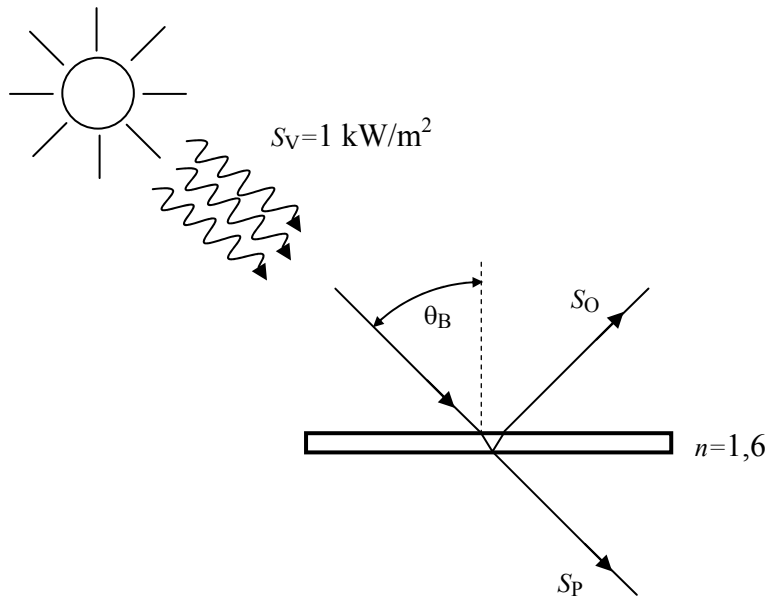
$$\sin \theta_B = \frac{n}{\sqrt{n^2 + 1}}$$

$$\Gamma_{\text{TE}} = \frac{\cos \theta_B - \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_B}}{\cos \theta_B + \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_B}} = \frac{1 - \sqrt{n^2(n^2 + 1) - n^2}}{1 + \sqrt{n^2(n^2 + 1) - n^2}} = \frac{1 - n^2}{1 + n^2} = -0,385$$

$$S_O = S_V \frac{|\Gamma_{\text{TE}}|^2 + |\Gamma_{\text{TM}}|^2}{2} = \frac{1}{2} S_V |\Gamma_{\text{TE}}|^2 = \underline{\underline{74 \text{ W/m}^2}}$$

(V/5/7/00/1)

Nepolarizirana sončna svetloba z gostoto pretoka moči $S_V=1 \text{ kW/m}^2$ vpada pod Brewster-jevim kotom na okno iz stekla z lomnim količnikom $n=1,6$. Izračunajte gostoto moči prepuščene svetlobe S_P z upoštevanjem odbojev pri vstopu in izstopu iz okna! Odboje višjih redov (večkratne odboje) zanemarite!



Najprej določimo Brewster-jev kot

$$\theta_B = \arctan n = 1,0122 \text{ rd} = 57,99^\circ$$

Odbojnost za TM komponento znaša nič, medtem ko je odbojnost TE komponente

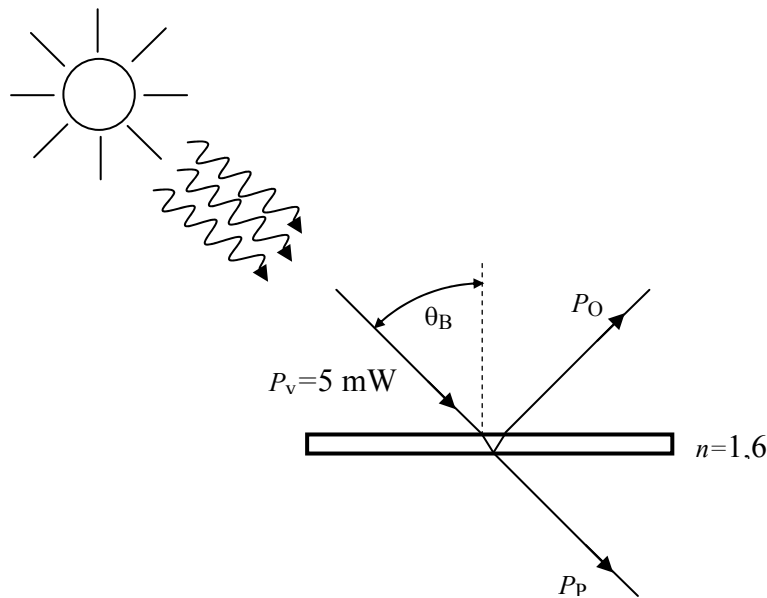
$$\Gamma_{TE} = \frac{\cos\theta_B - \sqrt{n^2 - \sin^2\theta_B}}{\cos\theta_B + \sqrt{n^2 - \sin^2\theta_B}} = -0,4382$$

Pri izračunu gostote moči prepuščene svetlobe je potrebno upoštevati dva odboja: enega pri vstopu svetlobe v okno in drugega pri izstopu svetlobe iz okna.

$$S_P = S_V \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2} (1 - |\Gamma_{TE}|^2)^2 \right) = 1 \text{ kW/m}^2 \cdot \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cdot 0,808^2 \right) = \underline{\underline{826 \text{ W/m}^2}}$$

(V/22/1/03/1)

Svetlobni žarek vpada iz praznega prostora na površino snovi z lomnim količnikom $n=1,6$ pod Brewster-jevim kotom. Kolikšna je tedaj odbojnost za TE polarizacijo Γ_{TE} ? Kolikšna je moč odbitega žarka P_O od površine snovi, če je vpadni žarek nepolariziran in ima moč $P_V=5 \text{ mW}$?



Najprej določimo Brewster-jev kot.

$$\theta_B = \arctg n = \underline{1,012 \text{ rd}}$$

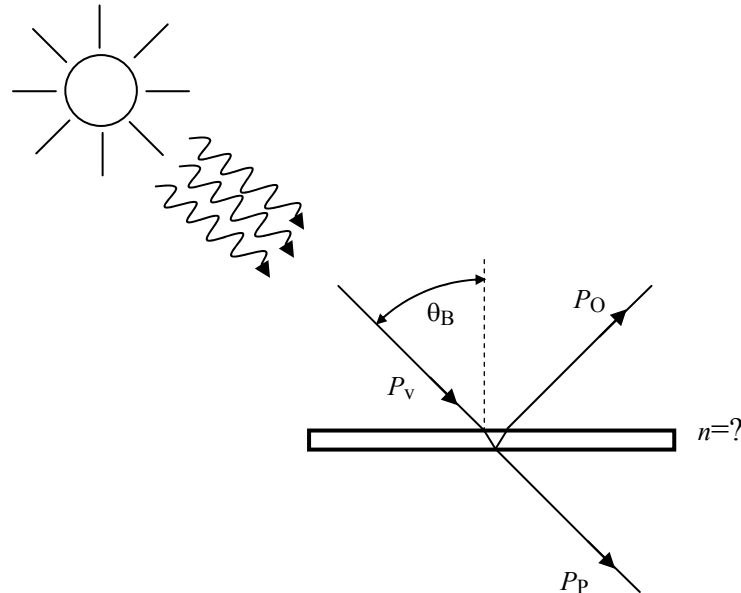
$$\Gamma_{TM} = \underline{0}$$

$$\Gamma_{TE} = \frac{\cos \theta_B - \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_B}}{\cos \theta_B + \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_B}} = \underline{-0,438}$$

$$P_O = P_V \frac{|\Gamma_{TE}|^2 + |\Gamma_{TM}|^2}{2} = \underline{\underline{0,48 \text{ mW}}}$$

(U/15/2/01/1)

Nepolarizirana sončna svetloba vpada iz praznega prostora na prozorno snov z neznanim lomnim količnikom n pod Brewster-jevim kotom θ_B . Izračunajte lomni količnik snovi n , če znaša moč odbitega žarka $P_O=0,01 \cdot P_V$ moči vpadnega žarka!



$$\Gamma_{TM} = 0 \rightarrow n^2 \cos \theta_B - \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_B} = 0 \rightarrow \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_B} = n^2 \cos \theta_B$$

$$\Gamma_{TE} = \frac{\cos \theta_B - \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_B}}{\cos \theta_B + \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_B}} = \frac{\cos \theta_B - n^2 \cos \theta_B}{\cos \theta_B + n^2 \cos \theta_B} = \frac{1 - n^2}{1 + n^2}$$

$$\frac{P_O}{P_V} = \frac{1}{2} (|\Gamma_{TE}|^2 + |\Gamma_{TM}|^2) \rightarrow |\Gamma_{TE}| = \sqrt{2 \frac{P_O}{P_V}} = \pm \frac{1 - n^2}{1 + n^2}$$

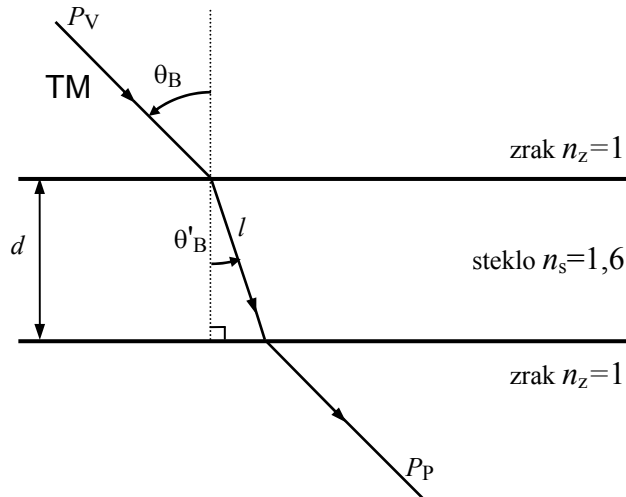
$$\pm \sqrt{2 \frac{P_O}{P_V}} (1 + n^2) = 1 - n^2$$

$$n^2 \left(\pm \sqrt{2 \frac{P_O}{P_V}} + 1 \right) = 1 \mp \sqrt{2 \frac{P_O}{P_V}}$$

$$n = \frac{1 \mp \sqrt{2 \frac{P_O}{P_V}}}{\sqrt{1 \pm \sqrt{2 \frac{P_O}{P_V}}}} = \underline{\underline{0,867; 1,153}}$$

(V/02/02/04/1)

Žarek polariziranega HeNe laserja moči $P_V=2$ mW z valovno dolžino $\lambda=632,8$ nm vpada pod Brewster-jevim kotom θ_B na stekleno ploščico debeline $d=15$ mm. Izračunajte največjo moč prepuščenega žarka P_P v zraku na drugi strani ploščice, če ima steklo lomni količnik $n_s=1,6$ in slabljenje $a=100$ dB/m! Polarizacijo laserja nastavimo za največjo prepuščeno moč.



Laser nastavimo na TM polarizacijo. Na ta način ne dobimo odbojev in je prepuščena moč največja.

$$\text{zrak: } \theta_B = \arctan\left(\frac{n_s}{n_z}\right) = \arctan\left(\frac{1,6}{1}\right) = 58^\circ$$

$$\text{steklo: } \theta'_B = \arctan\left(\frac{n_z}{n_s}\right) = \arctan\left(\frac{1}{1,6}\right) = 32^\circ$$

$$\cos\theta'_B = \frac{1}{\sqrt{1 + \tan^2\theta'_B}}$$

$$l = \frac{d}{\cos\theta'_B} = d \sqrt{1 + \left(\frac{1}{n_s}\right)^2} = 15 \text{ mm} \sqrt{1 + \left(\frac{1}{1,6}\right)^2} = \underline{17,7 \text{ mm}}$$

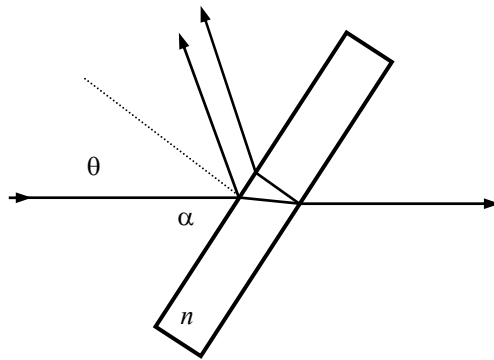
Po prehodu skozi steklo se žarek oslabi za $a[\text{dB/m}] \cdot l = 100 \text{ dB/m} \cdot 17,7 \text{ mm} = 1,77 \text{ dB}$.

Moč prepuščenega žarka torej znaša

$$P_P = P_V 10^{-\frac{al}{10}} = 2 \text{ mW} \cdot 10^{-\frac{1,77}{10}} = \underline{\underline{1,33 \text{ mW}}}$$

(V/24/3/00/1)

Polarizacijo HeNe laserske cevi za $\lambda=632,8$ nm določa Brewster-jevo okno v obliki primerno nagnjene steklene ploščice znotraj laserskega resonatorja. Določite dodatno vstavitveno slabljenje okna za neželjeno polarizacijo a v dB! Kolikšen mora biti kot α med ploščico in osjo cevi, če je lomni količnik ploščice $n=1,6$?



$$\theta = \arctg n = \underline{1,012 \text{ rd} = 58^\circ}$$

$$\alpha = \frac{\pi}{2} - \theta = \underline{\underline{0,559 \text{ rd} = 32^\circ}}$$

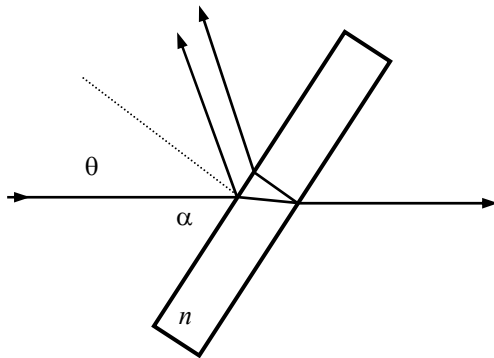
$$\Gamma_{\text{TE}} = \frac{\cos\theta - \sqrt{n^2 - \sin^2\theta}}{\cos\theta + \sqrt{n^2 - \sin^2\theta}} = \underline{\underline{-0,438}}$$

$$a = \left(1 - |\Gamma_{\text{TE}}|^2\right)^2 = \underline{\underline{0,653}}$$

$$a_{\text{dB}} = 10 \log a = \underline{\underline{-1,85 \text{ dB}}}$$

(U/30/6/98/1)

Plinski laser ima vgrajeno Brewster-jevo okno iz stekla z lomnim količnikom $n=1,5$. Izračunajte kot med stekleno ploščico in osjo laserske cevi! Koliko znašajo dodatne izgube svetlobe (v dB) za neželjeno polarizacijo pri enem prehodu žarka skozi ploščico? Upoštevajte glavna odboja na obeh površinah ploščice, odboje višjih redov pa zanemarite!



$$\Gamma_{\text{TM}} = \frac{n^2 \cos \theta - \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}}{n^2 \cos \theta + \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}} = 0 \rightarrow 0 = n^2 \cos \theta - \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}$$

$$n^4 \cos^2 \theta = n^2 - \sin^2 \theta = n^2 - 1 + \cos^2 \theta$$

$$(n^4 - 1) \cos^2 \theta = n^2 - 1 \rightarrow \cos^2 \theta = \frac{n^2 - 1}{n^4 - 1}$$

$$\theta = \arccos \frac{1}{\sqrt{n^2 + 1}} = 0,983 \text{ rd} = 56,3^\circ$$

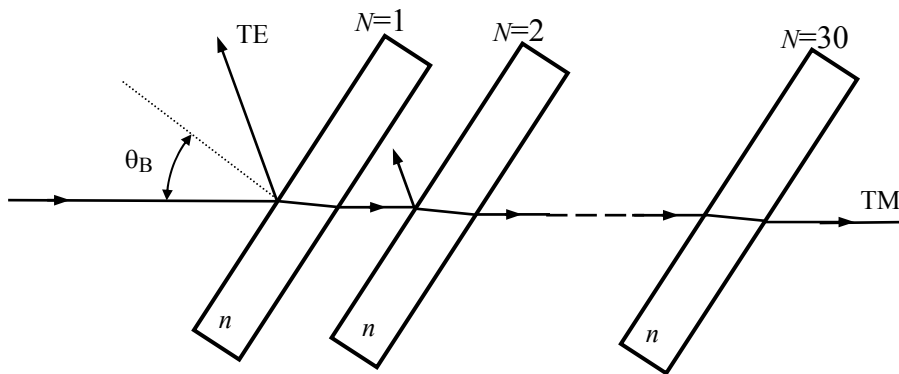
$$\alpha = \frac{\pi}{2} - \theta = 33,7^\circ = 0,588 \text{ rd}$$

$$\Gamma_{\text{TE}} = \frac{\cos \theta - \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}}{\cos \theta + \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}} = \frac{1 - n^2}{1 + n^2} = -0,3846$$

$$a_{\text{dB}} = 10 \log(1 - |\Gamma_{\text{TE}}|^2) = -1,39 \text{ dB}$$

(U/26/6/02/1)

Polarizator svetlobe izdelamo tako, da svetlobni žarek spustimo pod Brewster-jevim kotom skozi zaporedje $N=30$ steklenih ploščic. Pri tem se večji del TE polariziranega valovanja izgubi v odbitih žarkih, TM valovanje pa se lomi skozi zaporedje ploščic brez izgub. Izračunajte slabljenje TE polarizacije (v dB) takšnega polarizatorja, če so ploščice iz stekla z $n=1,5$, vmes pa je zrak!



$$\Gamma_{TM} = 0 \rightarrow n^2 \cos \theta - \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta} = 0 \rightarrow \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta} = n^2 \cos \theta$$

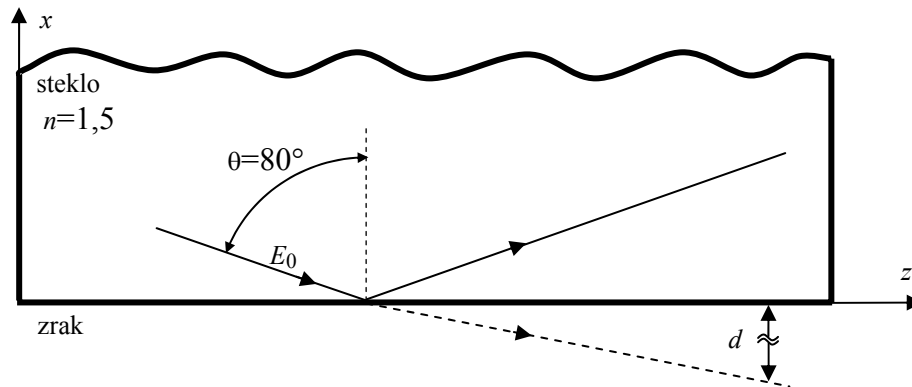
$$\Gamma_{TE} = \frac{\cos \theta - \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}}{\cos \theta + \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}} = \frac{1 - n^2}{1 + n^2} = \underline{\underline{-0,385}}$$

$$a_{dB} = 2N \cdot 10 \log(1 - |\Gamma_{TE}|^2) = \underline{\underline{-41,7 \text{ dB}}}$$

5. Svetlovodi (planarni, krožni)

(U/20/6/01/1)

Zelen žarek ($\lambda=0,5 \mu\text{m}$ v zraku) v stekleni ploščici $n=1,5$ vpada na mejo steklo/zrak pod kotom $\theta=80^\circ$ in se popolnoma odbije. Izračunajte oddaljenost d nad površino ploščice, kjer jakost polja upade za $a=-60 \text{ dB}$ glede na polje na površini ploščice!



$$k_0^2 = k_{x_0}^2 + k_{z_0}^2 = k_{x_0}^2 + k_z^2$$

$$k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0}$$

$$k_z = k \sin \theta = \frac{2\pi}{\lambda} n \sin \theta$$

$$k_{x_0} = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \cos \theta = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \sqrt{1 - n^2 \sin^2 \theta}$$

$$|k_{x_0}| = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{n^2 \sin^2 \theta - 1}$$

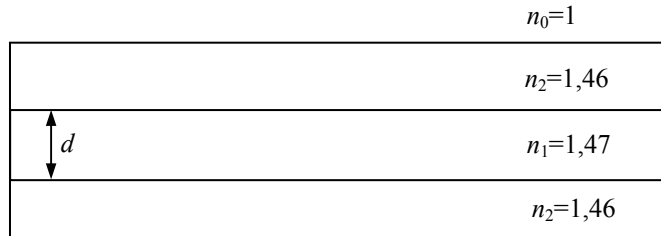
$$a = 20 \log \left| \frac{E}{E_0} \right| = -60 \text{ dB} \rightarrow \left| \frac{E}{E_0} \right| = 10^{-3} = e^{-|k_x|d}$$

Evanescentni val v zraku upade za 60 dB glede na polje na površini ploščice pri oddaljenosti

$$d = \frac{1}{|k_x|} \ln 10^3 = \frac{\lambda \ln 10^3}{2\pi \sqrt{n^2 \sin^2 \theta - 1}} = \underline{\underline{506 \text{ nm}}}$$

(V/22/1/02/1)

Planarni optični valovod je sestavljen iz osrednje plasti z lomnim količnikom $n_1=1,47$ in dveh debelih oblog z lomnim količnikom $n_2=1,46$. Izračunajte največjo dopustno debelino osrednje plasti d , da se po valovodu širita en sam TE rod in en sam TM rod pri valovni dolžini svetlobe (v praznem prostoru $n_0=1$) $\lambda_0=1550$ nm!



$$V = k_0 d \sqrt{n_1^2 - n_2^2} < \pi$$

$$k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0}$$

$$d_{\max} = \frac{\lambda_0}{2\sqrt{n_1^2 - n_2^2}} = \frac{1,55 \mu\text{m}}{2\sqrt{1,47^2 - 1,46^2}} = \underline{\underline{4,53 \mu\text{m}}}$$

(U/28/8/08/2)

Stekleno ploščico z lomnim količnikom $n=1,6$ in debelino $d=3$ mm uporabljamo kot planarni svetlobni valovod. Obloga dielektričnega valovoda je prazen prostor. Izračunajte razliko v zakasnitvi med najpočasnejšim in najhitrejšim žarkom $\Delta t=?$ Valovna dolžina svetlobe $\lambda=514$ nm, dolžina ploščice je $l=1$ m. ($c_0=3 \cdot 10^8$ m/s)

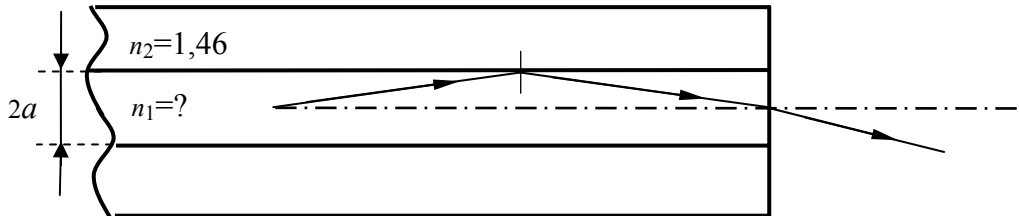
$$t_1 = \frac{l}{c_0} n$$

$$t_2 = \frac{l}{c_0} n \frac{1}{\sin \theta_k} = \frac{l}{c_0} n^2$$

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{l}{c_0} n(n-1) = \underline{\underline{3,2 \cdot 10^{-9} \text{ s} = 3,2 \text{ ns}}}$$

(V/26/6/02/1)

Določite lastnosti jedra optičnega vlakna (lomni količnik n_1 in polmer jedra a), da bo imelo vlakno numerično aperturo $NA=0,1$ ter bo postalo mnogorodovno pri valovni dolžini $\lambda_0=1,27 \mu\text{m}$ (v praznem prostoru)! Obloga vlakna je izdelana iz čistega kremenovega stekla z lomnim količnikom $n_2=1,46$.

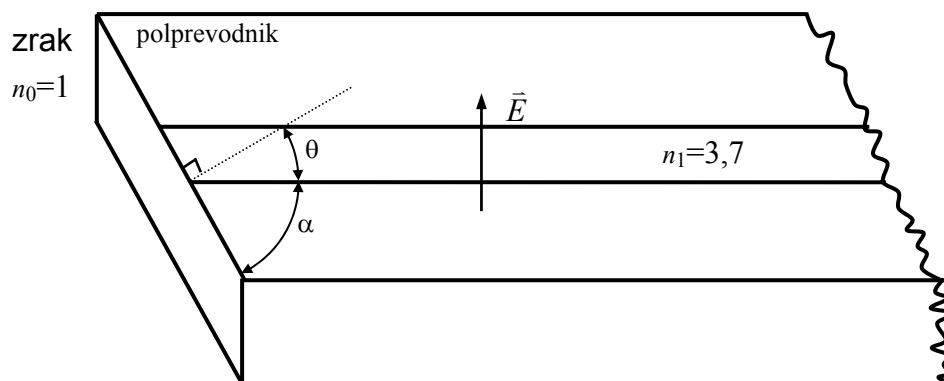


$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \rightarrow n_1 = \sqrt{NA^2 + n_2^2} = \underline{\underline{1,4634}}$$

$$V = 2,405 = k_0 a NA = \frac{2\pi}{\lambda_0} \cdot a NA \rightarrow a = \frac{2,405 \lambda_0}{2\pi NA} = \underline{\underline{4,861 \mu\text{m}}}$$

(U/29/3/02/1)

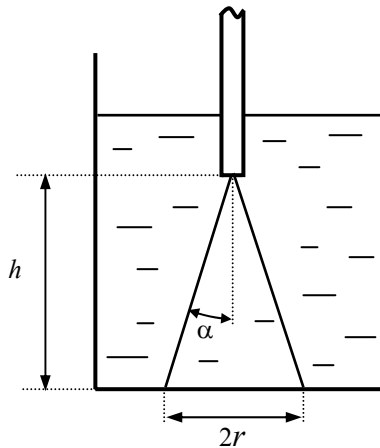
Delovanje DFB laserja motijo neželeni odboji svetlobe na meji polprevodnik-zrak. Kolikšen kot α mora zaklepati smer valovoda z izstopno ploskvijo čipa, če laser niha na enem samem TE rodu? Lomni količnik sredice valovoda znaša $n_1=3,7$, lomni količnik zraka n_0 pa je praktično enak enoti.



$$\alpha = \frac{\pi}{2} - \theta_B = \frac{\pi}{2} - \arctg \frac{n_0}{n_1} = \frac{\pi}{2} - \arctg \frac{1}{3,7} = \frac{\pi}{2} - 0,264 = \underline{\underline{1,307 \text{ rd} = 74,88^\circ}}$$

(V/11/10/02/1)

Mnogorodovno optično vlakno z numerično aperturo $NA=0,18$ je na enem koncu priključeno na svetlobni izvor, na drugem koncu pa ga potopimo v tekočino z lomnim količnikom $n=1,3$. Kolikšen je premer $2r$ svetle lise na dnu posode s tekočino, če se potopljeni konec vlakna nahaja na višini $h=10$ cm nad dnom posode?



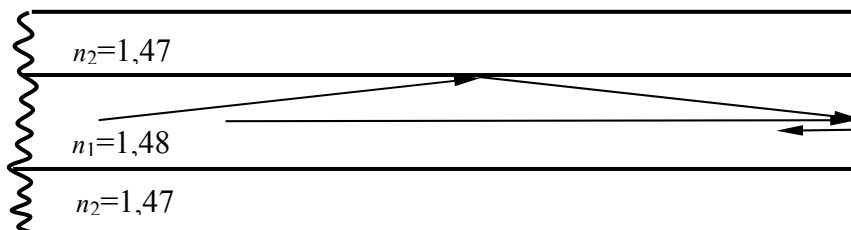
prazen prostor: $\sin \alpha' = NA$

$$\text{lom v tekočino: } \sin \alpha = \frac{\sin \alpha'}{n} = \frac{NA}{n} = \frac{0,18}{1,3} = \underline{0,138}$$

$$2r = 2h \operatorname{tg} \alpha = 2 \cdot 10 \text{ cm} \cdot \frac{0,138}{\sqrt{1-0,138^2}} = \underline{\underline{2,8 \text{ cm}}}$$

(U/18/7/01/1)

Mnogorodovno optično vlakno s premerom sredice $2r=50 \mu\text{m}$, lomnim količnikom jedra $n_1=1,48$ ter lomnim količnikom obloge $n_2=1,47$ je odrezano pod pravim kotom. Izračunajte odstotek moči svetlobe posameznih rodov, ki se na koncu vlakna odbije nazaj v vlakno, za oba skrajna primera: a_1 za rodove nizkih redov, ki se širijo skoraj v smeri osi vlakna, ter a_2 za rodove visokih redov, ki se širijo pod kotom, ki komaj še dopušča popolni odboj na meji med jedrom in oblogo!



$$\Gamma_1 = \frac{n_1 - 1}{n_1 + 1} = \underline{0,194}$$

$$a_1 = |\Gamma_1|^2 = \underline{\underline{3,75\%}}$$

$$\sin \theta_m = \frac{n_2}{n_1} = 0,993 = \cos \theta_v$$

$$\Gamma_{\text{TE}} = \frac{\cos \theta_v - \sqrt{1/n_1^2 - \sin^2 \theta_v}}{\cos \theta_v + \sqrt{1/n_1^2 - \sin^2 \theta_v}} = \underline{0,197}$$

$$\Gamma_{\text{TM}} = \frac{1/n_1^2 \cos \theta_v - \sqrt{1/n_1^2 - \sin^2 \theta_v}}{1/n_1^2 \cos \theta_v + \sqrt{1/n_1^2 - \sin^2 \theta_v}} = \underline{-0,190}$$

$$a_{2\text{TE}} = |\Gamma_{\text{TE}}|^2 = \underline{\underline{3,9\%}}$$

$$a_{2\text{TM}} = |\Gamma_{\text{TM}}|^2 = \underline{\underline{3,6\%}}$$

(V/9/4/99/2)

Stekleno optično vlakno (lomni količnik približno 1,5) ima stopničast lomni lik z relativno razliko lomnih količnikov jedra in obloge $\Delta=0,003$. Izračunajte polmer jedra vlakna, da vlakno postane mnogorodovno pri frekvenci $f=300$ THz!

Višji rodovi pri $V = 2,405$

$$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1} = 0,003$$

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \sqrt{(n_1 - n_2)(n_1 + n_2)} = \sqrt{\Delta n_1 (n_1 + n_2)} = \sqrt{\Delta n_1^2 + \Delta n_1 n_2}$$

Ker je $n_2 \approx n_1$ sledi

$$NA \approx \sqrt{\Delta n_1^2 + \Delta n_1^2} = n_1 \sqrt{2\Delta} = \underline{0,116}$$

$$V = k_0 a NA$$

$$a = \frac{V}{k_0 NA} = \frac{V}{2\pi f \sqrt{\mu_0 \epsilon_0} NA} = \frac{V c_0}{2\pi f NA} = \frac{2,405 \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{2\pi \cdot 300 \cdot 10^{12} \text{ /s} \cdot 0,116} = \underline{\underline{3,29 \mu\text{m}}}$$

(V/9/6/99/2)

Gradientno optično vlakno 62,5/125 ima jedro premera $2a=62,5 \mu\text{m}$ s parabolničnim profilom lomnega količnika. Določite numerično aperturo vlakna NA na oddaljenosti $d=20 \mu\text{m}$ od osi vlakna, če znaša numerična apertura na osi $NA_0=0,2$!

$$NA_0 = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \approx n_1 \sqrt{2\Delta_0}$$

$$\Delta = \Delta_0 \left(1 - \left(\frac{d}{a} \right)^2 \right)$$

$$NA(d) \approx n \sqrt{2\Delta} \approx n_1 \sqrt{2\Delta} = n_1 \sqrt{2\Delta_0 \left(1 - \left(\frac{d}{a} \right)^2 \right)} = NA_0 \sqrt{1 - \left(\frac{d}{a} \right)^2} = 0,2 \sqrt{1 - \left(\frac{20}{31,25} \right)^2} = \underline{\underline{0,154}}$$

(V/1/2/00/2)

Lomni količnik jedra mnogorodovnega gradientnega vlakna se spreminja po izrazu:

$$n(r) = 1,5 - 0,0001 \cdot r^2 \quad \text{kjer je } r \text{ podan v } \mu\text{m}.$$

Izračunajte relativno razliko lomnih količnikov Δ in numerično aperturo NA na osi vlakna, če znaša premer jedra $d=50 \mu\text{m}$!

$$n_1 = n(r = 0) = \underline{1,5}$$

$$n_2 = n\left(r = \frac{d}{2} = 25\right) = \underline{1,438}$$

$$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1} = \frac{1,5 - 1,438}{1,5} = \underline{\underline{0,042}}$$

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \underline{\underline{0,428}}$$

(V/24/3/00/2)

Svetlobni signal prihaja po vlaknu z gradientnim profilom lomnega količnika $50/125 \mu\text{m}$ in numerično aperturo $NA=0,15$. Izračunajte numerično aperturo NA' vlakna $62,5/125 \mu\text{m}$, ki ga privarimo na prvo vlakno, da bodo izgube svetlobe pri prestopu v novo vlakno najmanjše!

Parabolični profil: $\frac{\Delta'}{\Delta} = \left(\frac{a'}{a}\right)^2$ pogoj za enako parabolo

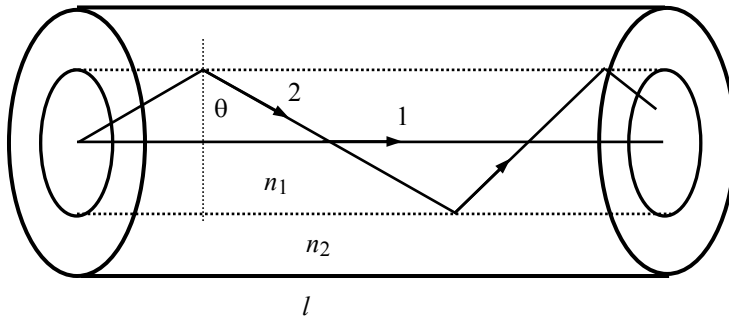
$$NA \approx n\sqrt{2\Delta} \rightarrow \frac{NA'}{NA} = \frac{\sqrt{2\Delta'}}{\sqrt{2\Delta}} = \frac{\sqrt{\Delta'}}{\sqrt{\Delta}} = \frac{a'}{a}$$

Numerična apertura drugega vlakna je potemtakem

$$NA' = NA \cdot \frac{2a'}{2a} = 0,15 \cdot \frac{62,5 \mu\text{m}}{50 \mu\text{m}} = \underline{\underline{0,1875}}$$

(V/15/2/01/2)

Mnogorodovno optično vlakno ima jedro premera $2a=50 \mu\text{m}$ in oblogo iz čistega kremenovega stekla z lomnim količnikom $n_2=1,46$. Izračunajte lomni količnik jedra n_1 , če se na dolžini $l=10 \text{ km}$ svetlobni impulz razširi za $\Delta t=1 \mu\text{s}$ zaradi razlik v hitrosti širjenja različnih rodov!



$$\sin \theta = \frac{n_2}{n_1}$$

$$t_1 = \frac{l}{c_1} = \frac{ln_1}{c_0}$$

$$t_2 = \frac{l}{c_1 \sin \theta} = \frac{ln_1^2}{c_0 n_2}$$

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{l}{c_0} \cdot n_1 \left(\frac{n_1}{n_2} - 1 \right)$$

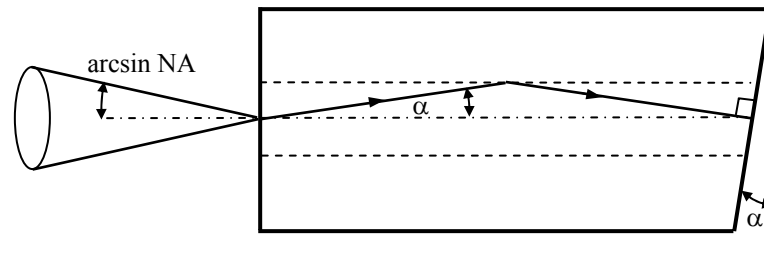
$$n_1^2 - n_1 n_2 - \frac{\Delta t c_0}{l} \cdot n_2 = 0$$

$$n_1^2 - 1,46 n_1 - 0,0438 = 0$$

$$n_1 = \frac{1,46 + \sqrt{1,46^2 + 4 \cdot 0,0438}}{2} = \underline{\underline{1,4894}}$$

(V/18/6/03/2)

Svetlobna vlakna z numerično aperturo $NA=0,1$ in premerom jedra $2a=10 \mu\text{m}$ spajamo s pomočjo kotno brušenih (APC) konektorjev. Pod kakšnim kotom α glede na pravokotnico morajo biti brušene spojne ploskve konektorjev, da preprečimo neželeni odboj svetlobe nazaj v jedro vlakna? $n_{\text{jedra}} \approx 1,5$



Numerična odprtina vlakna je definirana kot sinus vstopnega kota.

$$NA = \sin \alpha_0$$

Iz Snell-ovega lomnega zakona pri vstopu svetlobe iz zraka v vlakno dobimo

$$\frac{\sin \alpha_0}{n_{\text{jedra}}} = \frac{\sin \alpha}{n_{\text{zraka}}}$$

Lomljen kot α je tudi potreben naklon za brušenje konektorja.

Ker je lomni količnik zraka približno 1, se kot brušenja konektorja lahko izračuna iz

$$\alpha = \arcsin \frac{NA}{n_{\text{jedra}}} = \arcsin \frac{0,1}{1,5} = \underline{\underline{3,82^\circ}}$$

(U/13/6/07/1)

Izračunajte kot α , pod katerim mora biti brušena ferula konektorja z vgrajenim mnogorodovnim svetlobnim vlaknom, da odbita svetloba ni več vodena v vlaknu. Vlakno ima zunanji premer $2r_{\text{jedra}}=50 \mu\text{m}$, numerično aperturo $NA=0,2$ in lomni količnik jedra $n_1=1,463$. Kot α merimo glede na pravokoten rez (0°).

$$\alpha = \arcsin \left(\frac{NA}{n_1} \right) = \arcsin \left(\frac{0,2}{1,463} \right) = \underline{\underline{7,86^\circ}} = \underline{\underline{0,137 \text{ rd}}}$$

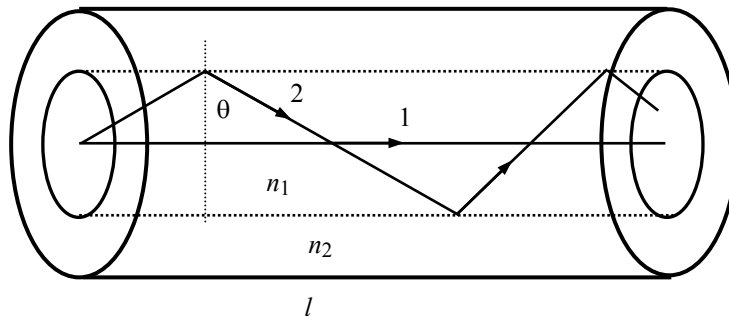
(V/29/09/04/1)

Svetlobno vlakno je opremljeno s kotno brušenimi (APC) vtičnicami pod kotom $\alpha=8^\circ$ glede na pravokoten rez. Kolikšna je lahko največja numerična apertura NA , da se odbita svetloba ne ujame v jedru vlakna z lomnim količnikom $n_{\text{jedra}} \approx 1,47$? ($\lambda=1,3 \mu\text{m}$, $c_0=3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$)

$$NA = \sin \alpha_0 = n_{\text{jedra}} \sin \alpha = 1,47 \cdot \sin 8^\circ = \underline{\underline{0,2046}}$$

(V/2/2/04/2)

Mnogorodovno optično vlakno 50/125 μm ima oblogo iz čistega kremenovega stekla z lomnim količnikom $n_2=1,46$ in numerično aperturo $NA=0,2$. Izračunajte domet l zveze z zmogljivostjo $C=34 \text{ Mbit/s}$, če naj se impulzi ne razširijo za več kot četrtno bitne periode ($\Delta t=T/4$) in ima vlakno stopničast lomni lik! Kakšen je domet l' zveze za idealno gradientno vlakno?



$$n_1 = \sqrt{n_2^2 + NA^2} = \underline{\underline{1,474}}$$

$$\Delta \approx \frac{1}{2} \left(\frac{NA}{n_1} \right)^2 = \underline{\underline{0,0092}}$$

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{T}{4} = \frac{1}{4C} = \underline{\underline{7,35 \text{ ns}}}$$

Stopničasto vlakno:

$$\Delta t = \frac{l n_1 \Delta}{c_0} \rightarrow l = \frac{\Delta t c_0}{n_1 \Delta} = \underline{\underline{162,5 \text{ m}}}$$

Gradientno vlakno:

$$\Delta t = \frac{l' n_1 \Delta^2}{c_0} \rightarrow l' = \frac{\Delta t c_0}{n_1 \Delta^2} = \underline{\underline{17,6 \text{ km}}}$$

(U/30/6/98/2)

Izračunajte premer jedra enorodovnega vlakna s stopničastim lomnim likom, da bo znašala mejna valovna dolžina $\lambda_0=1,3 \mu\text{m}$ za nastanek višjih rodov ($V=2,405$)! Lomni količnik obloge je $n_2=1,482$, jedra pa $n_1=1,487$. Kolikšna je numerična apertura takšnega vlakna?

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \sqrt{1,487^2 - 1,482^2} = \underline{\underline{0,1218}}$$

$$V = k_0 \cdot a \cdot NA = \frac{2\pi}{\lambda_0} \cdot a \cdot NA$$

Premer jedra vlakna znaša

$$2a = \frac{V \cdot \lambda_0}{\pi \cdot NA} = \frac{2,405 \cdot 1,3 \cdot 10^{-6} \text{ m}}{\pi \cdot 0,1218} = \underline{\underline{8,17 \mu\text{m}}}$$

(U/23/9//98/2)

Optična zveza uporablja gradientna vlakna $50/125 \mu\text{m}$ z (največjo) numerično aperturo sredi jedra vlakna $NA=0,15$. Izračunajte dodatne izgube svetlobe v dB, ki nastanejo takrat, ko pretrgan kabel pokrpamo z vgradnjo dolgega kosa neustreznega gradientnega vlakna $62,5/125 \mu\text{m}$ z enako numerično aperturo NA . Koliko bi morala znašati numerična apertura vlakna $62,5/125 \mu\text{m}$ s parabolčnim potekom lomnega količnika, da ne bi prišlo do dodatnih izgub pri krpanju z vlaknom $50/125 \mu\text{m}$?

$$a = 10 \log \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^2 = \underline{\underline{-1,94 \text{ dB}}}$$

Za steklena vlakna je $n \approx 1,5$.

$$\Delta_1 = \frac{NA_1^2}{2n^2}$$

Ker se lomni količnik $n(r)$ spreminja po paraboli, je razmerje polmerov kvadrirano.

$$\Delta_2 = \Delta_1 \left(\frac{r_2}{r_1} \right)^2$$

$$NA_2 = n \sqrt{2\Delta_2} = NA_1 \left(\frac{r_2}{r_1} \right) = \underline{\underline{0,1875}} \rightarrow \text{da je profil lomnega količnika povsem enak}$$

(U/5/7/00/2)

Stekleno optično vlakno ima pri valovni dolžini $\lambda_1=1,3 \mu\text{m}$ slabljenje $a_1=0,35 \text{ dB/km}$. Ocenite slabljenje istega vlakna a_2 pri valovni dolžini $\lambda_2=850 \text{ nm}$, če upoštevamo, da je glavni vzrok slabljenja v obeh slučajih Rayleigh-ovo sipanje svetlobe na nehomogenostih v steklu!

$$a_2 = a_1 \left(\frac{f_2}{f_1} \right)^4 = a_1 \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right)^4 = 0,35 \text{ dB/km} \cdot \left(\frac{1,3 \mu\text{m}}{0,85 \mu\text{m}} \right)^4 = \underline{\underline{1,915 \text{ dB/km}}}$$

(U/27/2/09/2)

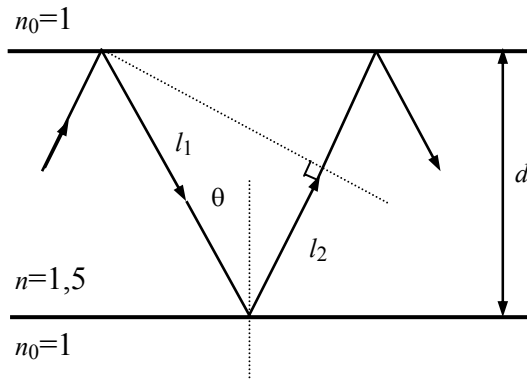
Enorodovno svetlobno vlakno ima pri valovni dolžini $\lambda=980 \text{ nm}$ (v praznem prostoru) slabljenje $a_1=1,3 \text{ dB/km}$, ki ga v glavnem povzroča Rayleigh-ovo sipanje svetlobe na nehomogenostih stekla. Pri kateri valovni dolžini $\lambda'=?$ se slabljenje podvoji, če v obeh primerih vzbudimo v vlaknu le osnovni rod valovanja HE₁₁?

$$a' = a \left(\frac{f'}{f} \right)^4 = a \left(\frac{\lambda}{\lambda'} \right)^4 = 2a$$

$$\lambda' = \frac{\lambda}{\sqrt[4]{2}} = \underline{\underline{824 \text{ nm}}}$$

(U/20/9/00/2)

Določite približno število rodov N (TE in TM), ki se lahko širi v planarnem valovodu v obliki steklene ploščice z lomnim količnikom $n=1,5$ in debelino $d=1$ mm! Za svetlobo z valovno dolžino $\lambda_0=0,6$ μm v praznem prostoru lahko pri oceni števila rodov zanemarimo fazni zasuk pri popolnem odboju svetlobe, ker je $d \gg \lambda$.



$$l = l_1 + l_2 = \frac{d}{\cos \theta} + \frac{d}{\cos \theta} \cos 2\theta = \frac{d}{\cos \theta} (1 + \cos 2\theta) = 2d \cos \theta$$

$$\theta_{\min} = \frac{\pi}{2} \rightarrow \underline{l_{\min} = 0}$$

$$\theta_{\max} = \arcsin \frac{1}{n} \rightarrow l_{\max} = 2d \sqrt{1 - \left(\frac{1}{n}\right)^2} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{1}{1,5}\right)^2} = \underline{1,491 \text{ mm}}$$

$$N = \frac{l_{\max} - l_{\min}}{\lambda} = n \frac{l_{\max} - l_{\min}}{\lambda_0} = 1,5 \cdot \frac{1,491 \cdot 10^{-3} \text{ m}}{0,6 \cdot 10^{-6} \text{ m}} = \underline{3727} \quad \leftarrow \text{TE ali TM}$$

$$\text{TE+TM} = \underline{2N=7454}$$

(U/15/2/01/2)

Izračunajte lomni količnik jedra vlakna n_1 , da bo znašala mejna valovna dolžina višjih rodov $\lambda=1,27 \mu\text{m}$ (v praznem prostoru). Lomni količnik obloge je $n_2=1,46$, premer jedra znaša $2r=9 \mu\text{m}$ in predpostavljamo idealni stopničasti lomni lik (mejna frekvenca višjih rodov $V=2,405$).

$$V = k_0 r NA = \frac{2\pi}{\lambda} r NA \rightarrow NA = \frac{V\lambda}{2\pi r} = \frac{2,405 \cdot 1,27 \cdot 10^{-6} \text{ m}}{\pi \cdot 9 \cdot 10^{-6} \text{ m}} = \underline{0,108}$$

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \rightarrow n_1 = \sqrt{NA^2 + n_2^2} = \sqrt{0,108^2 + 1,46^2} = \underline{\underline{1,464}}$$

(U/21/4/06/1)

Določite lomni količnik jedra svetlobnega vlakna n_1 , če ima vlakno jedro premera $2a=3 \mu\text{m}$ in mora biti enorodovno na valovnih dolžinah $\lambda_1=980 \text{ nm}$ in $\lambda_2=1550 \text{ nm}$ hkrati! Lomni količnik obloge znaša $n_2=1,462$. Kolikšna je numerična apertura NA takšnega vlakna?

$$V = k_0 a NA = \frac{2\pi}{\lambda} a NA = 2,405$$

$$NA = \frac{V\lambda}{2\pi a} = \frac{2,405 \cdot 980 \cdot 10^{-9} \text{ m}}{2\pi \cdot 1,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}} = \underline{0,25}$$

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

$$n_1 = \sqrt{NA^2 + n_2^2} = \sqrt{0,25^2 + 1,462^2} = \underline{\underline{1,483}}$$

(U/19/12/03/2)

Planarni valovod, debeline plasti $d=10 \mu\text{m}$ na podlagi iz čistega kremenovega stekla $n_2=1,46$, postane mnogorodoven pri frekvenci $f=250 \text{ THz}$. Izračunajte lomni količnik plasti n_1 , ki jo naneseemo na podlago in pokrijemo z dovolj debelo oblogo z enakim lomnim količnikom n_2 , kot ga ima podlaga! ($c=3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$)

$$V = \pi = kdNA \rightarrow NA = \frac{\pi}{kd} = \frac{\pi c_0}{\omega d} = \frac{c_0}{2fd} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{2 \cdot 250 \cdot 10^{12} \text{ Hz} \cdot 10 \cdot 10^{-6} \text{ m}} = \underline{0,06}$$

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \rightarrow n_1 = \sqrt{n_2^2 + NA^2} = \underline{\underline{1,4612}}$$

(U/20/6/01/2)

Svetlobo privedemo po kablu z optičnim vlaknom s stopničastim lomnim likom, premerom jedra $d_1=50 \mu\text{m}$ in numerično aperturo $NA_1=0,1$ na fotodiodo. Fotodioda je opremljena s krajšim kosom gradientnega vlakna s paraboličnim lomnim likom in s premerom jedra $d_2=62,5 \mu\text{m}$. Izračunajte potrebno numerično aperturo NA_2 (v sredini) gradientnega vlakna, da so izgube svetlobe zaradi spoja različnih vlaken čim manjše!

$$\Delta = \frac{n_1(r) - n_2}{n_1(r)}$$

$$NA(r) = \sqrt{n_1^2(r) - n_2^2} = \sqrt{(n_1(r) - n_2)(n_1(r) + n_2)} = \sqrt{\Delta n_1(r)(n_1(r) + n_2)}$$

Ker je $(n_1(r) + n_2) \approx 2n$ in $n_1(r) \approx n$ sledi

$$NA(r) = \sqrt{n_1^2(r) - n_2^2} \approx \sqrt{2n\Delta n(r)}$$

$$\Delta n(r) = \Delta n_{\max} \left(1 - \left(\frac{r}{d_2/2} \right)^2 \right) \rightarrow \Delta n_{\max} = \frac{\Delta n(r)}{1 - \left(\frac{r}{d_2/2} \right)^2} = \frac{\Delta n_1}{1 - \left(\frac{d_1}{d_2} \right)^2}$$

$$NA_2 = NA_{\max} \approx \sqrt{2n\Delta n_{\max}} = \frac{\sqrt{2n} \cdot \sqrt{NA_1^2}}{\sqrt{1 - \left(\frac{d_1}{d_2} \right)^2}} = \frac{NA_1}{\sqrt{1 - \left(\frac{d_1}{d_2} \right)^2}} = \frac{0,1}{\sqrt{1 - 0,64}} = \underline{\underline{0,167}}$$

(U/29/3/02/2)

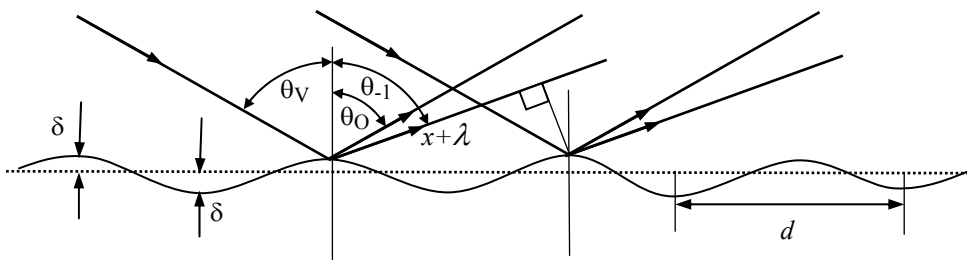
Oblogi planarnega svetlovoda izdelam iz stekla z lomnim količnikom $n_2=1,46$, sredico svetlovoda pa iz stekla z lomnim količnikom $n_1=1,48$. Izračunajte debelino sredice d , da se pri valovni dolžini $\lambda_0=1,3 \mu\text{m}$ (v praznem prostoru) širijo po valovodu največ $m=3$ trije TE in trije TM rodovi!

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \underline{0,2425}$$

$$V = m \cdot \pi = k_0 d NA \rightarrow d = \frac{m\pi}{k_0 NA} = \frac{m\lambda_0}{2NA} = \frac{3 \cdot 1,3 \mu\text{m}}{2 \cdot 0,242} = \underline{\underline{8,04 \mu\text{m}}}$$

(U/18/6/03/2)

Rdeči žarek HeNe laserja z valovno dolžino $\lambda=632,8 \text{ nm}$ vpada pod kotom $\theta_v=60^\circ$ na valovito površino uklonske mrežice s periodo $d=5 \mu\text{m}$ in amplitudo $\Delta=\pm 0,2 \mu\text{m}$. Izračunajte smeri θ_{+1} in θ_{-1} uklonjenih žarkov prvega reda v bližini osnovnega odbitega žarka v smeri $\theta_0=60^\circ$!

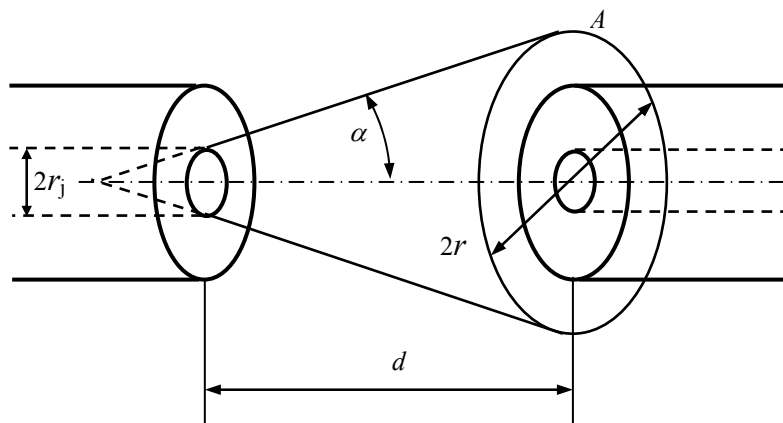


$$\left. \begin{array}{l} x = d \sin \theta_v = d \sin \theta_0 \\ x + \lambda = d \sin \theta_{-1} \\ x - \lambda = d \sin \theta_{+1} \end{array} \right\} \begin{array}{l} \theta_{-1} = \arcsin\left(\sin \theta_v + \frac{\lambda}{d}\right) = \underline{\underline{83,02^\circ}} \\ \theta_{+1} = \arcsin\left(\sin \theta_v - \frac{\lambda}{d}\right) = \underline{\underline{47,69^\circ}} \end{array}$$

6. Svetlobni sklopi

(V/18/1/04/2)

Določite potrebni vzdolžni razmik d med dvema konektorjema, da zmanjšamo jakost signala za 50%. Konektorja vsebujeta enaki enorodovni vlakni s stopničastim lomnim likom in premerom jedra $10\ \mu\text{m}$ ter premerom obloge $125\ \mu\text{m}$. Pri računu zanemarimo odboj svetlobe pri izstopu svetlobe iz jedra v zrak in ponovnem vstopu svetlobe v drugo vlakno. Numerična apertura je $NA=0,1$.



Zaradi razširitve sevalnega snopa iz prvega vlakna zapišemo

$$r = r_j + d \operatorname{tg} \alpha .$$

Kot α izrazimo z numerično aperturo

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha} = \frac{\sin \alpha}{\sqrt{1 - \sin^2 \alpha}} = \frac{NA}{\sqrt{1 - NA^2}}$$

Ker je numerična apertura majhna vrednost, lahko zapišemo približek $\operatorname{tg} \alpha \approx NA$.

$$r = r_j + d \cdot \operatorname{tg} \alpha \approx r_j + d \cdot NA$$

Zmanjšana jakost signala je enaka razmerju površine snopa in jedra.

$$\frac{1}{2} = \frac{A_j}{A} = \frac{\pi r_j^2}{\pi r^2} \approx \frac{r_j^2}{(r_j + d \cdot NA)^2}$$

Izraz korenimo in izračunamo razmik

$$d \approx \frac{\sqrt{2} \cdot r_j - r_j}{NA} = \underline{\underline{20\ \mu\text{m}}}$$

(U/14/9/99/2)

Izračunajte vstavitveno slabljenje (v dB) mehanskega spoja (konektorja) med dvema enakima mnogorodovnimi optičnima vlaknoma s premerom sredice $2r_j=50 \mu\text{m}$ in numerično aperturo $NA=0,2$! Osi vlaken sta sicer poravnani, zaradi nepravilnega vstavljanja konektorjev pa sta konca vlaken vzdolžno razmaknjena za $d=200 \mu\text{m}$. Odboj svetlobe na izstopni in vstopni površini vlaken zanemarimo ter upoštevamo, da je svetlobna moč enakomerno razporejena med množico rodov.

$$r = r_j + d \operatorname{tg} \alpha \approx r_j + d \cdot NA.$$

Slabljenje sklopa se izračuna iz razmerja površine snopa in jedra.

$$a_{\text{dB}} = 10 \log \frac{A}{A_j} = 10 \log \frac{\pi r^2}{\pi r_j^2} = 10 \log \left(\frac{r}{r_j} \right)^2 \approx 20 \log \left(1 + \frac{dNA}{r_j} \right) = \underline{\underline{8,3 \text{ dB}}}$$

(V/14/3/03/2)

Določite potrebni vzdolžni razmik d med koncema enakih mnogorodovnih vlaken $50/125 \mu\text{m}$ s stopničastim lomnim likom, da zmanjšamo jakost signala za $a=15 \text{ dB}$! Pri računu zanemarimo odboj svetlobe pri izstopu svetlobe iz jedra v zrak in ponovnem vstopu svetlobe v drugo vlakno. Numerična apertura je $NA=0,2$.

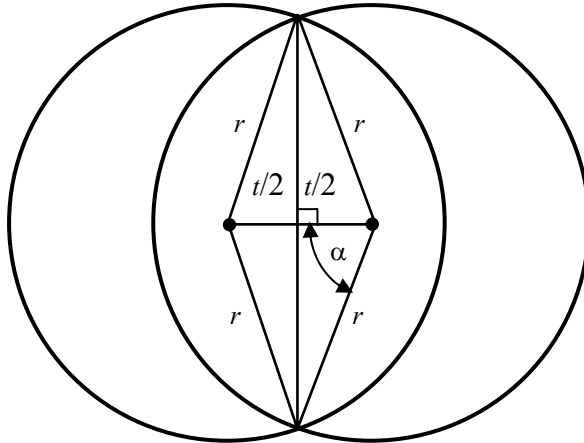
$$r \approx r_j + dNA$$

$$a_{\text{dB}} = 10 \log \frac{A}{A_j} = 20 \log \frac{r}{r_j} \approx 20 \log \left(1 + \frac{dNA}{r_j} \right)$$

$$d \approx \frac{r_j}{NA} \left(10^{\frac{a_{\text{dB}}}{20}} - 1 \right) = \frac{25 \mu\text{m}}{0,2} \left(10^{\frac{15}{20}} - 1 \right) = \underline{\underline{578 \mu\text{m}}}$$

(V/20/9/00/2)

Izračunajte slabljenje spoja a (v procentih) dveh enakih mnogorodovnih optičnih vlaken s premerom jedra $2r=50 \mu\text{m}$ in numerično aperturo $NA=0,2$! Pri spajanju vlaken pride do prečnega premika $t=20 \mu\text{m}$, prispevek slabljenja ostalih pojavov pa je zanemarljiv. Pri izračunu slabljenja upoštevamo, da se po vlaknu širi množica rodov in je svetlobna moč enakomerno porazdeljena med posameznimi rodovi.



Površina iz katere izhaja svetloba znaša

$$A_1 = \pi r^2 = \pi \cdot (25 \mu\text{m})^2 = \underline{1963,5 \mu\text{m}^2}$$

Polovica središčnega kota krožnega izseka znaša

$$\alpha = \arccos \frac{t/2}{r} = 66,422^\circ = \underline{1,159 \text{ rd}}$$

Ploščina enega krožnega odseka znaša

$$A_{\text{odseka}} = \alpha r^2 - \frac{t}{2} \sqrt{r^2 - \left(\frac{t}{2}\right)^2}$$

Površina v katero se sklapija svetloba je presek krožnic oziroma ploščina dveh krožnih odsekov.

$$A_2 = 2A_{\text{odseka}} = 2\left(724,5 \mu\text{m}^2 - 229 \mu\text{m}^2\right) = \underline{991 \mu\text{m}^2}$$

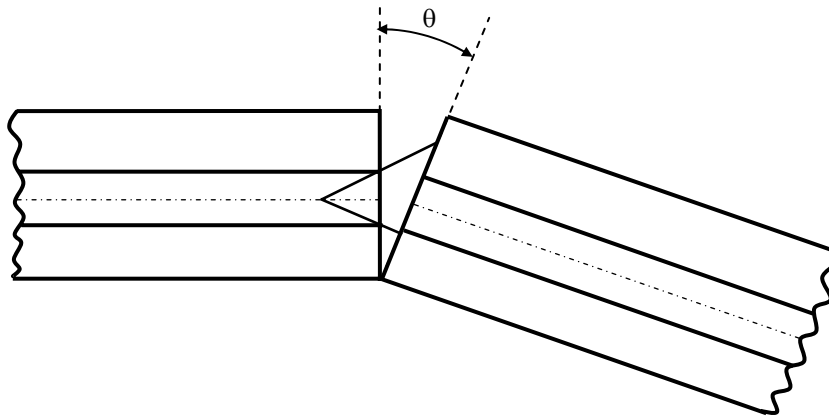
$$\eta = \frac{A_2}{A_1} = \frac{991 \mu\text{m}^2}{1963,5 \mu\text{m}^2} = \underline{50\%}$$

Za majhne zamike $t < r$ je kot krožnega izseka približno $\pi/2$ in izkoristek postane

$$\eta \approx \frac{2 \cdot \left(\alpha r^2 - \frac{tr}{2}\right)}{\pi r^2} \approx \frac{2 \cdot \left(\frac{\pi}{2} r^2 - \frac{tr}{2}\right)}{\pi r^2} = \frac{r^2 - \frac{tr}{\pi}}{r^2} = 1 - \frac{t}{\pi r}$$

(V/19/9/01/1)

Pri spajanju enakih mnogorodovnih vlaken s premerom sredice $2r_j=50 \mu\text{m}$ in premerom obloge $2r_o=125 \mu\text{m}$ vnaša velike izgube nagib osi enega vlakna glede na nagib osi drugega vlakna. Izračunajte kot nagiba θ , ko zaradi nagiba izgubimo polovico svetlobne moči! Lomni količnik jedra vlakna znaša $n_1=1,47$, lomni količnik obloge $n_2=1,46$. Vse ostale izvore izgub zanemarimo, svetlobna moč v prvem vlaknu je dobro porazdeljena med rodovi.

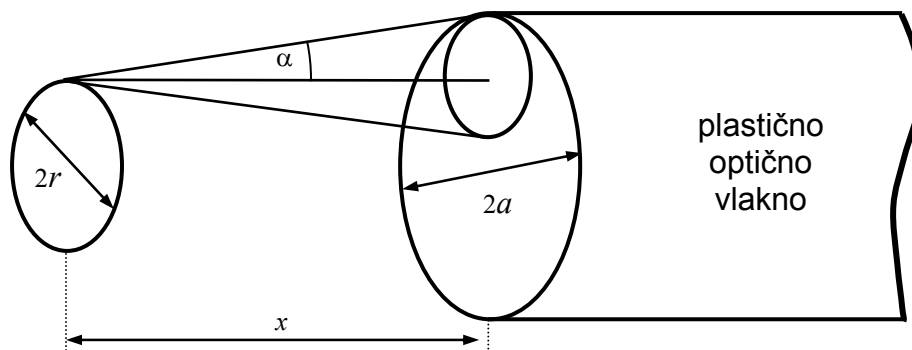


$$\theta \approx \arcsin NA = \arcsin \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \arcsin 0,171 \approx \underline{\underline{10^\circ}}$$

Za točen izračun je potrebno narediti razmerje ploščine jedra proti ploščini razširjenega žarka, ki ima obliko elipse.

(V/5/7/00/2)

Izračunajte sklopni izkoristek η svetleče diode na plastično optično vlakno s premerom jedra $2a=1$ mm in numerično aperturo $NA=0,47$! Svetleča dioda se obnaša kot kroglast izvor s polmerom $r=100$ μm in enakomerno seva v vse smeri. Koliko lahko odmaknemo (x) začetek vlakna od svetleče diode, da se sklopni izkoristek ne zmanjša?



Ker se svetleča dioda obnaša kot kroglast izvor, sklopni izkoristek znaša

$$\eta = \frac{\Omega}{4\pi} = \frac{2\pi(1 - \cos\alpha)}{4\pi} = \frac{1}{2}(1 - \sqrt{1 - NA^2}) = \underline{\underline{5,87\%}}$$

Pri maksimalni dopustni razširitvi sevalnega snopa svetleče diode zapišemo $r + x \operatorname{tg} \alpha = a$.

Od tu izračunamo dopusten odmik svetleče diode od jedra vlakna.

$$x = \frac{a - r}{\operatorname{tg} \alpha} = \frac{a - r}{\frac{\sin \alpha}{\cos \alpha}} = (a - r) \frac{\sqrt{1 - NA^2}}{NA} = 0,4 \text{ mm} \cdot \frac{\sqrt{1 - 0,47^2}}{0,47} = \underline{\underline{0,75 \text{ mm}}}$$

(U/9/6/99/2)

Določite sklopni izkoristek svetlobe majhnega neusmerjenega izvora na mnogorodovno optično vlakno s stopničastim lomnim likom z lomnim količnikom jedra $n_1=1,48$ in lomnim količnikom obloge $n_2=1,47$. Izvor je manjši od premera jedra vlakna (majhna svetleča dioda) in ga postavimo tako, da je sklop svetlobe v vlakno največji.

Numerična apertura mnogorodovnega optičnega vlakna s stopničastim lomnim likom znaša

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \sqrt{1,48^2 - 1,47^2} = \underline{0,172}.$$

Svetloba vstopa v optično vlakno pod prostorskim kotom

$$\Omega = 2\pi(1 - \cos \alpha) = 2\pi(1 - \sqrt{1 - NA^2}) = \underline{0,093 \text{ srd}}.$$

Izkoristek sklopa, ki je definiran kot razmerje vstopnega prostorskega kota proti celotnemu prostorskemu kotu neusmerjenega izvora (4π) znaša

$$\eta = \frac{\Omega}{4\pi} = \frac{0,093 \text{ srd}}{4\pi} = \underline{\underline{0,00743}} = \underline{\underline{0,743 \%}}.$$

(U/24/3/00/2)

Določite sklopni izkoristek svetleče diode premera $2r=300 \mu\text{m}$ na mnogorodovno optično vlakno s stopničastim lomnim likom, premerom jedra $2a=100 \mu\text{m}$ in numerično aperturo $NA=0,2$! Svetleča ploskev LED-ike seva kot Lambertov izvor svetlobe $S=S_0 \cdot \cos \theta$ na valovni dolžini $\lambda=900 \text{ nm}$. Odboj svetlobe pri vstopu v vlakno zanemarimo.

$$\alpha = \arcsin NA = \underline{0,201 \text{ rd}}$$

$$\eta = \left(\frac{a}{r}\right)^2 \cdot \frac{\int_0^\alpha S(\theta) \sin \theta d\theta}{\int_0^{\pi/2} S(\theta) \sin \theta d\theta} = \left(\frac{a}{r}\right)^2 \frac{1/4 - 1/4 \cos 2\alpha}{1/4 + 1/4} = \frac{1}{2} \left(\frac{a}{r}\right)^2 (1 - \cos 2\alpha) = \underline{\underline{0,44 \%}}$$

$$\int \cos \theta \sin \theta d\theta = \int \frac{1}{2} \sin 2\theta d\theta = -\frac{1}{4} \cos 2\theta + C$$

(U/14/3/03/2)

Izračunajte sklopni izkoristek η svetleče diode na mnogorodovno gradientno vlakno s premerom jedra $2r=50 \mu\text{m}$, premerom obloge $2r_o=125 \mu\text{m}$ in največjo numerično aperturo v osi vlakna $NA_{\text{max}}=0,2$! Vlakno ima parabolčni lomni lik. Svetleča dioda sveti kot neusmerjeno svetilo ($\lambda=1,3 \mu\text{m}$) s premerom, ki ustreza premeru jedra vlakna.

$$\Delta = \Delta_{\text{max}} \left(1 - \left(\frac{\rho}{r} \right)^2 \right)$$

$$NA \approx n\sqrt{2\Delta}$$

$$NA = NA_{\text{max}} \sqrt{1 - \left(\frac{\rho}{r} \right)^2}$$

$$\eta(\rho) = \frac{\Omega}{4\pi} \approx \frac{NA^2}{4}$$

$$\eta = \frac{1}{\pi r^2} \int_0^r \int_0^{2\pi} \eta(\rho) \rho d\rho d\varphi = \frac{2}{r^2} \int_0^r \frac{NA_{\text{max}}^2}{4} \left(1 - \frac{\rho^2}{r^2} \right) \rho d\rho = \frac{NA_{\text{max}}^2}{2r^2} \left(\frac{r^2}{2} - \frac{r^2}{4} \right) = \frac{NA_{\text{max}}^2}{8} = \underline{\underline{0,5\%}}$$

(V/25/5/01/2)

Svetlobni signal dobimo po optičnem vlaknu s premerom jedra $d_1=50 \mu\text{m}$ in stopničastim lomnim likom z numerično aperturo $NA_1=0,15$. Vstopno vlakno zavarimo na vlakno fotodetektorja s premerom jedra $d_2=62,5 \mu\text{m}$, stopničastim lomnim likom in numerično aperturo $NA_2=0,22$. Izračunajte izgubo signala na spoju različnih vlaken v dB a , če je zvar res kvalitetno opravljen in sam zvar ne vnaša dodatnih izgub!

$$\left. \begin{array}{l} NA_1 < NA_2 \\ d_1 < d_2 \end{array} \right\} \Rightarrow \underline{\underline{a = 0 \text{ dB}}}$$

Ni izgub!

(V/24/9/03/2)

Izračunajte slabljenje spoja a (v dB) dveh različnih mnogorodovnih vlaken. Svetloba najprej potuje po vlaknu s premerom jedra $d_1=50 \mu\text{m}$ in numerično aperturo $NA_1=0,2$. Drugo vlakno s premerom jedra $d_2=62,5 \mu\text{m}$ in numerično aperturo $NA_2=0,25$ je zavarjeno na konec prvega vlakna, da so izgube čim manjše in ni neželenih odbojev svetlobe. Obe vlakni imata zunanji premer obloge $d_o=125 \mu\text{m}$ in imata pri brezhibnem zvaru točno poravnane osi.

$$\left. \begin{array}{l} NA_1 < NA_2 \\ d_1 < d_2 \end{array} \right\} \Rightarrow \underline{\underline{a = 0 \text{ dB}}}$$

7. Polarizacija

(V/26/6/02/2)

Dvolomna snov ima za TE polarizacijo lomni količnik $n_{TE}=2,05$, za TM polarizacijo pa lomni količnik $n_{TM}=2,20$. Izračunajte debelino d $\lambda/4$ ploščice, ki jo izdelamo iz navedene snovi! Ploščico uporabljamo za pretvorbo linearno polarizirane svetlobe HeNe laserja z valovno dolžino $\lambda_0=632,8$ nm (v praznem prostoru) v krožno polarizirano svetlobo.

$$\Delta\varphi = \frac{\pi}{2} = k_{TM}d - k_{TE}d = n_{TM}k_0d - n_{TE}k_0d = (n_{TM} - n_{TE})\frac{2\pi}{\lambda_0}d$$

$$d = \frac{\lambda_0}{4(n_{TM} - n_{TE})} = \underline{\underline{1,055 \mu\text{m}}}$$

(U/9/6/99/1)

Desno-krožno polarizirana svetloba ($Q_V=0$) vpada na mejo zrak/steklo ($n=1,5$). Izrazite razmerje krožnih komponent odbitega vala (Q_0) kot funkcijo vpadnega kota θ (kot med smerjo razširjanja vpadne svetlobe in pravokotnico na površino stekla)!

$$Q_V = 0 \rightarrow E_{VH} = -jE_{VV}$$

$$E_{OH} = E_{VH} \cdot \Gamma_{TE}$$

$$E_{OV} = E_{VV} \cdot \Gamma_{TM}$$

$$\bar{I}_D = \frac{1}{\sqrt{2}}(\bar{I}_V - j\bar{I}_H)$$

$$\bar{I}_L = \frac{1}{\sqrt{2}}(\bar{I}_V + j\bar{I}_H)$$

$$E_{0D} = E_0 \cdot \bar{I}_D^* = \frac{1}{\sqrt{2}}(E_{VV}\Gamma_{TM} + jE_{VH}\Gamma_{TE}) = \frac{E_{VV}}{\sqrt{2}}(\Gamma_{TM} + \Gamma_{TE})$$

$$E_{0L} = E_0 \cdot \bar{I}_L^* = \frac{E_{VV}}{\sqrt{2}}(\Gamma_{TM} - \Gamma_{TE})$$

$$Q_0 = \frac{E_{0L}}{E_{0D}} = \frac{\Gamma_{TM} - \Gamma_{TE}}{\Gamma_{TM} + \Gamma_{TE}}$$

$$\Gamma_{TM} = \frac{n^2 \cos \theta - \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}}{n^2 \cos \theta + \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}}$$

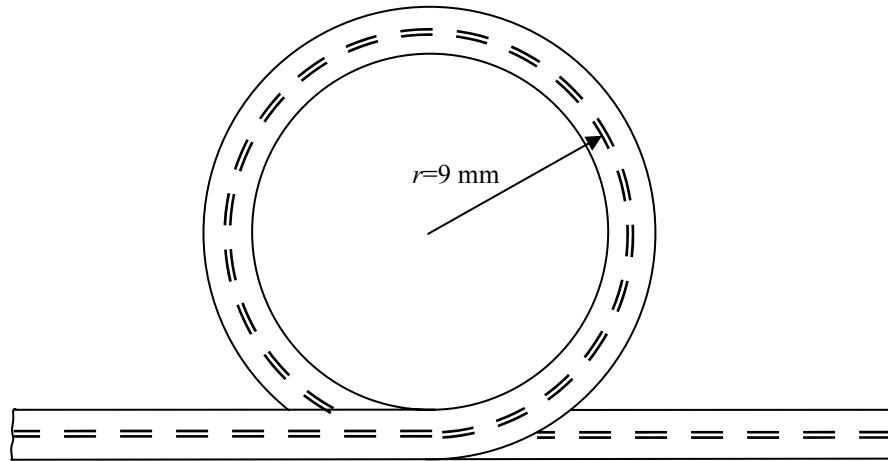
$$\Gamma_{TE} = \frac{\cos \theta - \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}}{\cos \theta + \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}}$$

$$Q_0 = \frac{(n^2 \cos \theta - \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta})(\cos \theta + \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}) - (\cos \theta - \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta})(n^2 \cos \theta + \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta})}{(n^2 \cos \theta - \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta})(\cos \theta + \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}) + (\cos \theta - \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta})(n^2 \cos \theta + \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta})}$$

$$Q_0 = -\frac{\cos \theta \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}}{\sin^2 \theta}$$

(U/18/6/03/1) (U26/6/02/2)

Enorodovno optično vlakno s povprečnim lomnim količnikom jedra $n=1,47$ navijemo na polmer $r=9$ mm, da postane jedro vlakna zaradi mehanske napetosti dvolomno. Za valovno dolžino $\lambda_0=1550$ nm en ovoj predstavlja četrtvalovno ($\lambda/4$) ploščico. Izračunajte razliko med lomnima količnikoma za TE in TM polarizacijo v zakrivljenjem delu vlakna Δn !



$$\varphi_{\text{TE}} = k_{\text{TE}} l = n_{\text{TE}} k_0 l$$

$$\varphi_{\text{TM}} = k_{\text{TM}} l = n_{\text{TM}} k_0 l$$

Četrtvalovna ploščica povzroča fazni premik:

$$\Delta\varphi = \frac{\pi}{2} = \varphi_{\text{TE}} - \varphi_{\text{TM}} = (n_{\text{TE}} - n_{\text{TM}}) k_0 l = \Delta n k_0 l$$

$$k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0}$$

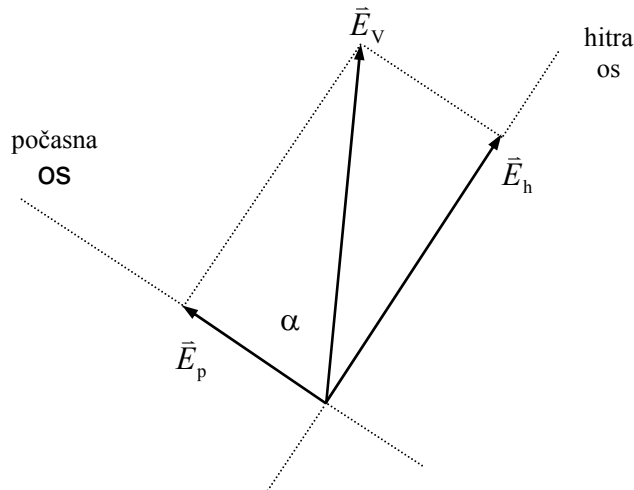
Dolžina vlakna navitega v krog znaša: $l = 2\pi r$

$$\frac{\pi}{2} = \Delta n \frac{2\pi}{\lambda_0} 2\pi r$$

$$\Delta n = \frac{\lambda_0}{4} \cdot \frac{1}{2\pi r} = \frac{1,55 \cdot 10^{-6} \text{ m}}{4 \cdot 2\pi \cdot 9 \cdot 10^{-3} \text{ m}} = \underline{\underline{6,853 \cdot 10^{-6}}}$$

(U/18/12/98/2)

Linearno-polarizirano svetlobo laserja pretvorimo v krožno s pomočjo $\lambda/4$ ploščice (primerno debel listek sljude). Pri sukanju listka okoli osi žarka dobimo linearno levo ali desno krožno polarizacijo. Za kakšen kot smemo zasukati listek iz idealnega položaja za krožno polarizacijo, da osno razmerje nastale eliptične polarizacije ne preseže $R=1$ dB?



$$R_{\text{dB}} = 20 \log \frac{|\vec{E}_h|}{|\vec{E}_p|} = 20 \log \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha} = 20 \log(\text{tg} \alpha)$$

$$\alpha = \text{arctg} \left(10^{\frac{R_{\text{dB}}}{20}} \right) = \text{arctg} \left(10^{\frac{1}{20}} \right) = \text{arctg}(1,12) = \underline{0,8428 \text{ rd}}$$

$$\Delta \alpha = \alpha - \frac{\pi}{4} = \underline{0,0574 \text{ rd} = 3,29^\circ}$$

8. Polarizacijska disperzija

(V/11/10/02/2)

Optični signal se širi po $l=6$ cm dolgem planarnem valovodu v kristalu iz LiNbO_3 , ki je močno dvolomen: za hitrejšo polarizacijo znaša lomni količnik $n'=2,05$, za počasnejšo polarizacijo pa $n''=2,2$. Izračunajte vrednost polarizacijske disperzije Δt , ki jo vnaša takšen valovod pri osrednji valovni dolžini svetlobe $\lambda=1,55 \mu\text{m}$ v praznem prostoru!

$$t' = \frac{l}{c'} = \frac{ln'}{c_0}$$

$$t'' = \frac{l}{c''} = \frac{ln''}{c_0}$$

$$\Delta t = t'' - t' = \frac{l}{c_0} (n'' - n') = \frac{6 \cdot 10^{-2} \text{ m}}{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}} (2,2 - 2,05) = \underline{\underline{3 \cdot 10^{-11} \text{ s} = 30 \text{ ps}}}$$

(U/28/8/08/5)

Enorodovno vlakno ima koeficient barvne disperzije $D_{\text{barvna}}=17$ ps/(nm·km) in koeficient polarizacijske rodovne disperzije $D_{\text{PMD}}=0,5$ ps/ $\sqrt{\text{km}}$. Pri kateri dolžini vlakna $l=?$ bosta učinka obeh disperzij enako velika, če znaša pasovna širina vira $\Delta\lambda=0,3$ nm? Koliko je tedaj skupna razširitev impulza $\Delta t=?$

$$\Delta t_b = D_{\text{barvna}} \cdot \Delta\lambda \cdot l$$

$$\Delta t_p = D_{\text{PMD}} \cdot \sqrt{l}$$

$$\Delta t_b = \Delta t_p \quad \rightarrow \quad D_{\text{barvna}} \cdot \Delta\lambda \cdot l = D_{\text{PMD}} \cdot \sqrt{l}$$

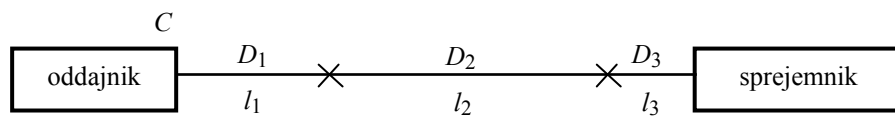
$$l = \left(\frac{D_{\text{PMD}}}{D_{\text{barvna}} \cdot \Delta\lambda} \right)^2 = \underline{\underline{0,096 \text{ km} = 9,6 \text{ m}}}$$

$$\Delta t = \Delta t_b + \Delta t_p = D_{\text{barvna}} \cdot \Delta\lambda \cdot l + D_{\text{PMD}} \cdot \sqrt{l} = \underline{\underline{0,098 \text{ ps} = 98 \text{ fs}}}$$

9. Kompenzacija disperzije

(V/25/5/01/5)

Optično zvezo sestavimo iz treh kosov različnih kablov. Prvi odsek ima disperzijski koeficient $D_1=+17$ ps/(nm·km) in dolžino $l_1=20$ km. Drugi odsek ima disperzijski koeficient $D_2=-5$ ps/(nm·km) in dolžino $l_2=40$ km. Tretji odsek ima disperzijski koeficient $D_3=+5$ ps/(nm·km) in dolžino $l_3=10$ km. Izračunajte zmogljivost zveze C , če naj se impulzi ne razširijo za več kot tretjino bitne periode! Kot izvor uporabimo FP laser na valovni dolžini $\lambda=1550$ nm s širino spektra $\Delta\lambda=1$ nm.



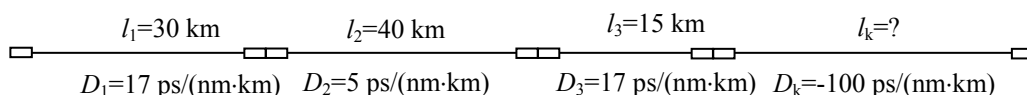
$$\Delta t = (D_1 l_1 + D_2 l_2 + D_3 l_3) \Delta \lambda$$

$$\Delta t = \left(+17 \frac{\text{ps}}{\text{nm} \cdot \text{km}} \cdot 20 \text{ km} - 5 \frac{\text{ps}}{\text{nm} \cdot \text{km}} \cdot 40 \text{ km} + 5 \frac{\text{ps}}{\text{nm} \cdot \text{km}} \cdot 10 \text{ km} \right) \cdot 1 \text{ nm} = \underline{190 \text{ ps}}$$

$$C = \frac{1}{3\Delta t} = \underline{\underline{1,75 \text{ Gbit/s}}}$$

(U/20/6/01/5)

Optična zveza na valovni dolžini $\lambda=1550$ nm je sestavljena iz odsekov z različnimi kablji. Prvi odsek vsebuje $l_1=30$ km navadnega enorodovnega vlakna z disperzijo $D_1=17$ ps/(nm·km), drugi odsek vsebuje $l_2=40$ km NZDSF vlakna z disperzijo $D_2=5$ ps/(nm·km) in tretji odsek spet navadno enorodovno vlakno dolžine $l_3=15$ km in $D_3=17$ ps/(nm·km). Kolikšna je potrebna dolžina kompenzacijskega vlakna l_k z disperzijo $D_k=-100$ ps/(nm·km), ki ga vgradimo pred sprejemnik, za popolno kompenzacijo disperzije?

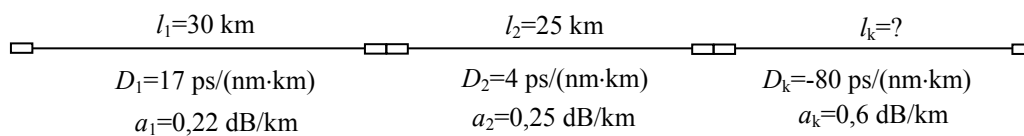


$$\Delta t = 0 = \Delta \lambda \cdot (l_1 D_1 + l_2 D_2 + l_3 D_3 + l_k D_k)$$

$$l_k = -\frac{l_1 D_1 + l_2 D_2 + l_3 D_3}{D_k} = \underline{\underline{9,65 \text{ km}}}$$

(U/19/12/03/5)

Svetlobno zvezo sestavimo iz vlaken v kabljih, ki so že vkopani. V prvem odseku zveze dolžine $l_1=30$ km imamo na razpolago le standardno vlakno G.652 z disperzijskim koeficientom $D_1=+17$ ps/(nm·km) in slabljenjem $a_1=0,22$ dB/km. V drugem odseku zveze dolžine $l_2=25$ km imamo na razpolago NZDSF vlakno z disperzijskim koeficientom $D_2=+4$ ps/(nm·km) in slabljenjem $a_2=0,25$ dB/km. Izračunajte potrebno dolžino l_K kompenzacijskega vlakna z disperzijskim koeficientom $D_K=-80$ ps/(nm·km) in slabljenjem $a_K=0,6$ dB/km, da bo celotna disperzija kompenzirane zveze nič! Kolikšno je celotno slabljenje a (dB) disperzijsko kompenzirane zveze?

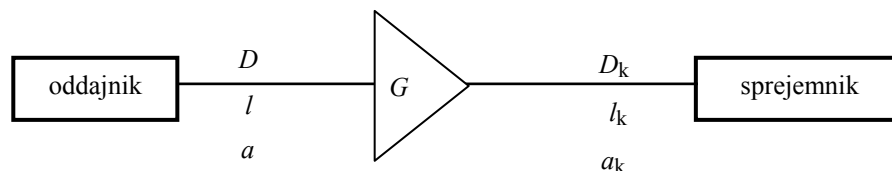


$$D_1 l_1 + D_2 l_2 + D_K l_K = 0 \rightarrow l_K = \frac{D_1 l_1 + D_2 l_2}{-D_K} = \underline{\underline{7,625 \text{ km}}}$$

$$a = a_1 l_1 + a_2 l_2 + a_K l_K = \underline{\underline{17,4 \text{ dB}}}$$

(V/2/2/04/5)

Odsek vlakna G.652 dolžine $l=60$ km s slabljenjem $a=0,22$ dB/km in disperzijo $D=17$ ps/(nm·km) uporabimo v visokozmogljivi zvezi tako, da na sprejemni strani vse slabljenje najprej nadomestimo z erbijevim svetlobnim predojačevalnikom in nato popravimo barvno disperzijo s kompenzacijskim vlaknom z $D_K=-80$ ps/(nm·km) in slabljenjem $a_K=0,7$ dB/km. Koliko naj bo jačenje ojačevalnika G , če mora nadomestiti slabljenje kabla in tudi slabljenje kompenzacijskega vlakna?



$$l \cdot D + l_K \cdot D_K = 0$$

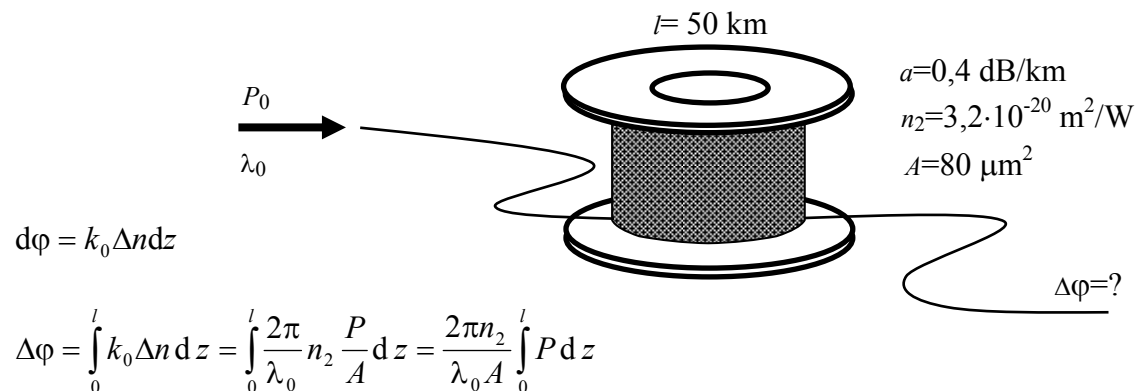
$$l_K = -\frac{l \cdot D}{D_K} = \underline{\underline{12,75 \text{ km}}}$$

$$G = a \cdot l + a_K \cdot l_K = 0,22 \text{ dB/km} \cdot 60 \text{ km} + 0,7 \text{ dB/km} \cdot 12,75 \text{ km} = \underline{\underline{22,1 \text{ dB}}}$$

10. Nelinearnost vlakna

(U/9/6/99/3)

Izračunajte dodatni (nelinearni) fazni zasuk v optičnem vlaknu dolžine $l=50$ km, če pošljemo v vlakno svetlobo $1,3 \mu\text{m}$ moči $P_0=10$ mW! Pri računu upoštevajte, da ima vlakno izgube $a=0,4$ dB/km in moč v vlaknu eksponencialno upada. Nelinearni lomni količnik stekla znaša $n_2=3,2 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$ in efektivna površina jedra vlakna $A=80 \mu\text{m}^2$.



Moč v vlaknu eksponencialno upada $P = P_0 e^{-\alpha[\text{km}^{-1}]z}$.

Ker enačba za moč zahteva linearne enote, je potrebno izgube v vlaknu ustrezno pretvoriti. Izgube v vlaknu imamo podane v logaritemskih enotah dB/km in so definirane kot

$$a[\text{dB/km}] = -\frac{10}{l} \log\left(\frac{P}{P_0}\right) = -\frac{10}{l} \log\left(\frac{P_0 e^{-\alpha[\text{km}^{-1}]l}}{P_0}\right) = -\frac{10}{l} \log\left(e^{-\alpha[\text{km}^{-1}]l}\right).$$

Po antilogaritmiranju dobimo $10^{-\frac{l}{10}a[\text{dB/km}]} = e^{-\alpha[\text{km}^{-1}]l}$.

Če ta izraz logaritmiramo z naravnim logaritmom dobimo linearne izgube v vlaknu.

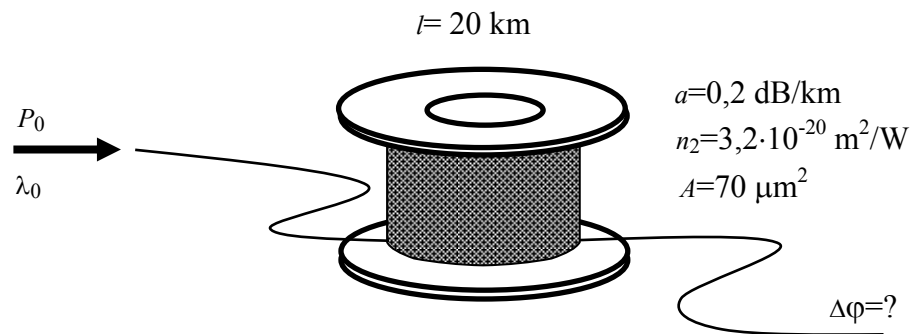
$$\alpha[\text{km}^{-1}] = -\frac{1}{l} \cdot \ln\left(10^{-\frac{l}{10}a[\text{dB/km}]}\right) = -\frac{1}{l} \cdot \log_e\left(10^{-\frac{l}{10}a[\text{dB/km}]}\right) = -\frac{1}{l} \cdot \frac{\log\left(10^{-\frac{l}{10}a[\text{dB/km}]}\right)}{\log(e)}$$

$$\alpha[\text{km}^{-1}] = -\frac{1}{l} \cdot \frac{-\frac{l}{10}a[\text{dB/km}]}{\log(e)} = \frac{a[\text{dB/km}]}{10 \log(e)} = \frac{\ln 10}{10} \cdot a[\text{dB/km}] = \underline{9,21 \cdot 10^{-5} \text{ m}^{-1}}$$

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi n_2 P_0}{\lambda_0 A \alpha} (1 - e^{-\alpha l}) = \frac{2\pi \cdot 3,2 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2 \cdot 10^{-2} \text{ W} \cdot (1 - e^{-9,21 \cdot 10^{-5} \text{ m}^{-1} \cdot 5 \cdot 10^4 \text{ m}})}{\text{W} \cdot 1,3 \cdot 10^{-6} \text{ m} \cdot 80 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2 \cdot 9,21 \cdot 10^{-5} \text{ m}^{-1}} = \underline{\underline{0,208 \text{ rd}}}$$

(U/13/6/07/2)

Enorodovno svetlobno vlakno ima efektivno površino jedra $A=70 \mu\text{m}^2$ in slabljenje $a=0,2 \text{ dB/km}$ pri valovni dolžini $\lambda=1550 \text{ nm}$. Izračunajte dodatni nelinearni fazni zasuk $\Delta\varphi$ v optičnem vlaknu dolžine $l=20 \text{ km}$, če znaša nelinearni koeficient lomnega količnika stekla $n_2=3,2 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$! Vstopna svetlobna moč v vlakno je $P_0=100 \text{ mW}$ in z razdaljo upada zaradi slabljenja vlakna.



Moč v vlaknu eksponencialno upada $P = P_0 e^{-\alpha[\text{km}^{-1}]z}$.

Ker enačba za moč zahteva linearne enote slabljenja, je potrebno izgube v vlaknu ustrezno pretvoriti. S tem postane moč v vlaknu

$$P = P_0 e^{-\frac{\ln 10}{10} a[\text{dB/km}]z}$$

$$d\varphi = \Delta k \cdot dz = \Delta n \cdot k_0 \cdot dz = \Delta n \cdot \frac{2\pi}{\lambda_0} \cdot dz = \frac{P}{A} n_2 \cdot \frac{2\pi}{\lambda_0} \cdot dz$$

$$\Delta\varphi = \int_0^l d\varphi = \int_0^l P_0 e^{-\frac{\ln 10}{10} a[\text{dB/km}]z} \frac{2\pi}{\lambda_0} \frac{n_2}{A} dz$$

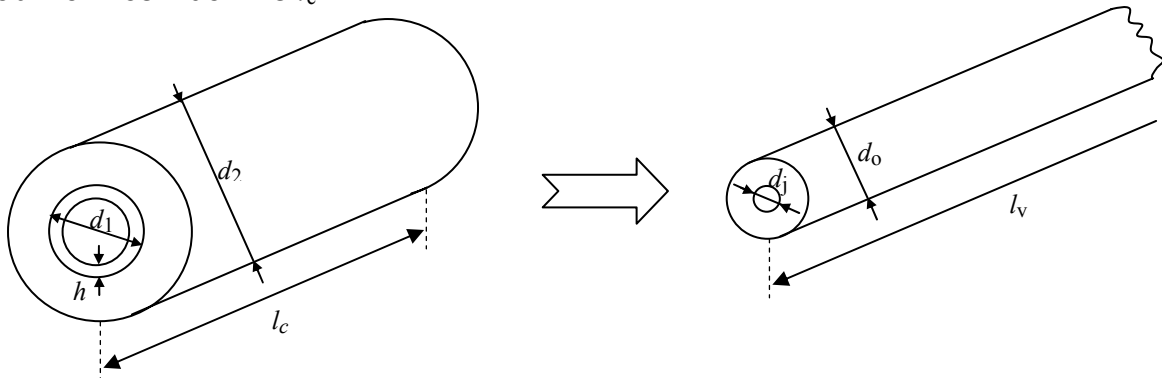
$$\Delta\varphi = \frac{2\pi n_2}{\lambda_0 A} \cdot \frac{10 P_0}{\ln 10 \cdot a[\text{dB/km}]} \cdot e^{-\frac{\ln 10}{10} a[\text{dB/km}]z} \Big|_0^l$$

$$\Delta\varphi = \frac{20\pi n_2}{\lambda_0 A} \cdot \frac{P_0}{\ln 10 \cdot a[\text{dB/km}]} \cdot \left(1 - e^{-\frac{\ln 10}{10} a[\text{dB/km}]l}\right) = 4,02 \text{ rd} \cdot \left(1 - e^{-\frac{\ln 10}{10} a[\text{dB/km}]l}\right) = \underline{\underline{2,42 \text{ rd} = 139^\circ}}$$

11. MCVD

(V/25/5/01/1)

Optično vlakno izdelamo s tehnologijo MCVD tako, da postopek začnemo s cevjo iz čistega kremenčevega stekla z notranjim premerom $d_1=15$ mm in zunanjim premerom $d_2=25$ mm. Kako debelo h oblogo z dodatkom germanijevega oksida moramo nanesti na notranjo stran cevi, da bo končni izdelek enorodovno vlakno s premerom jedra $d_j=10$ μm in zunanjim premerom obloge $d_o=125$ μm ? Koliko kilometrov vlakna l_v dobimo iz cevi dolžine $l_c=1$ m?



Razmerje površin preseka jedra in obloge znaša:

$$\frac{A_j}{A_o} = \frac{d_j^2}{d_o^2 - d_j^2} = \frac{d_1^2 - (d_1 - 2h)^2}{d_2^2 - d_1^2} = \frac{4d_1h - 4h^2}{d_2^2 - d_1^2}$$

$$4h^2 - 4d_1h + \frac{d_j^2}{d_o^2 - d_j^2} \cdot (d_2^2 - d_1^2) = 0$$

$$4h^2 - 60h + \frac{100}{15625 - 100} \cdot (625 - 225) = 0$$

$$4h^2 - 60h + 2,576 = 0$$

$$h = \frac{60 - \sqrt{3600 - 41,22}}{8} \text{ mm} = \underline{\underline{0,044 \text{ mm}}}$$

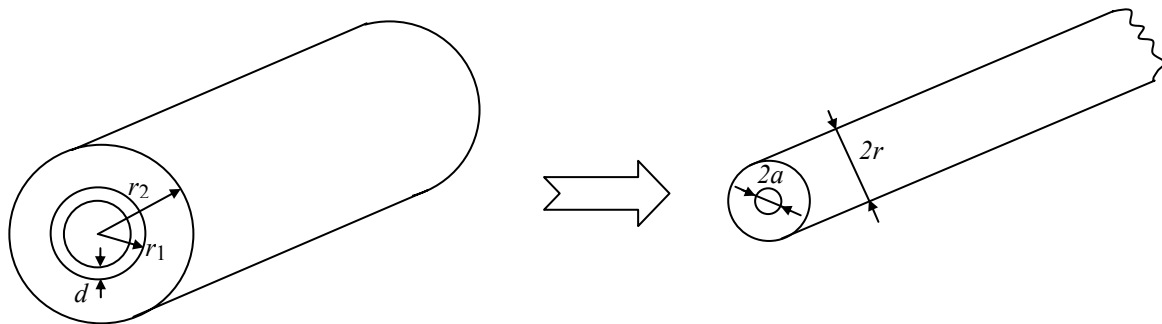
Dolžino dobljenega vlakna dobimo tako, da izenačimo volumne jedra ali obloge.

$$V_o = \frac{\pi}{4} (d_2^2 - d_1^2) l_c = \frac{\pi}{4} (d_o^2 - d_j^2) l_v$$

$$l_v = \frac{d_2^2 - d_1^2}{d_o^2 - d_j^2} \cdot l_c = \frac{625 - 225}{0,015625 - 0,0001} \cdot 1 \text{ m} = \underline{\underline{25765 \text{ m} = 25,8 \text{ km}}}$$

(V/24/9/03/1)

Enorodovno optično vlakno izdelamo s tehnologijo MCVD tako, da v notranjost cevi iz čistega kremenovega stekla nanesemo plast z dodatkom germanijevega oksida. Izračunajte debelino nanese plasti d , če znaša notranji polmer kremenove cevi $r_1=5$ mm, zunanji polmer $r_2=15$ mm in mora imeti končni izdelek zunanji premer $2r=125$ μm , numerično aperturo $NA=0,1$ ter mejno valovno dolžino $\lambda=1,25$ μm za enorodovno delovanje!



$$\underline{V = 2,405}; \quad k = \frac{2\pi}{\lambda}; \quad V = kNA$$

$$a = \frac{V}{kNA} = \frac{2,405\lambda}{2\pi NA} = \underline{4,785 \mu\text{m}}$$

$$\frac{A_{\text{jedra}}}{A_{\text{obloge}}} = \frac{\pi a^2}{\pi(r^2 - a^2)} = \frac{\pi[r_1^2 - (r_1 - d)^2]}{\pi(r_2^2 - r_1^2)}$$

$$(r_1 - d)^2 = r_1^2 - \frac{a^2(r_2^2 - r_1^2)}{r^2 - a^2}$$

$$d = r_1 - \sqrt{r_1^2 - \frac{a^2(r_2^2 - r_1^2)}{r^2 - a^2}} = \underline{\underline{119 \mu\text{m}}}$$

(U/18/7/01/2)

Enorodovno optično vlakno izdelamo po postopku MCVD. Postopek začnemo s cevjo iz čistega kremenovega stekla SiO_2 z lomnim količnikom 1,46, notranjim premerom $d_n=15$ mm in zunanjim premerom $d_z=25$ mm. Izračunajte debelino obloge d zmesi SiO_2 in GeO_2 , ki jo moramo nanesti na notranjo steno cevi, da po skrčenju cevi in vlečenju vlakna s premerom $d_v=125$ μm dobimo numerično aperturo $NA=0,1$ in mejno valovno dolžino višjih rodov $\lambda_0=1,3$ μm !

$$V = 2,405 = k_0 a NA = \frac{2\pi}{\lambda_0} a NA \rightarrow a = \frac{2,405 \cdot \lambda_0}{2\pi NA} = \underline{4,976 \mu\text{m}}$$

Enaka razmerja površin:

$$\frac{\pi a^2}{\pi \left(\frac{d_v}{2}\right)^2 - \pi a^2} = \frac{\pi \left(\frac{d_n}{2}\right)^2 - \pi \left(\frac{d_n}{2} - d\right)^2}{\pi \left(\frac{d_z}{2}\right)^2 - \pi \left(\frac{d_n}{2}\right)^2} \rightarrow \frac{4a^2}{d_v^2 - 4a^2} = \frac{4dd_n - 4d^2}{d_z^2 - d_n^2} \approx \frac{4dd_n}{d_z^2 - d_n^2}$$

$$d \approx \frac{(d_z^2 - d_n^2) \cdot a^2}{(d_v^2 - 4a^2) \cdot d_n}$$

$$\underline{\underline{d \approx 42,5 \mu\text{m}}}$$

(V/29/9/04/2)

Svetlobno vlakno izdelamo s tehnologijo MCVD tako, da nanesemo z višjim lomnim količnikom $n_1=1,47$ na notranjo steno cevi iz čistega kremenovega stekla z lomnim količnikom $n_2=1,46$, zunanji premerom $d_2=25$ mm in notranjim premerom $d_1=10$ mm. Kolikšna naj bo debelina nanešene plasti d , da bo imelo izdelano vlakno zunanji premer $d_v=125$ μm in mejno valovno dolžino enorodovnega delovanja $\lambda_0=1,2$ μm ?

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = 0,1712$$

$$V = 2,405 = k_0 a NA = \frac{2\pi}{\lambda_0} a NA \rightarrow a = \frac{2,405 \cdot \lambda_0}{2\pi NA} = \underline{\underline{2,6834 \mu\text{m}}}$$

Enaka razmerja površin:

$$\frac{A_{jedra}}{A_{obloga}} = \frac{\pi a^2}{\pi \left(\left(\frac{d_v}{2} \right)^2 - a^2 \right)} = \frac{\pi \left(\left(\frac{d_1}{2} \right)^2 - \left(\frac{d_1}{2} - d \right)^2 \right)}{\pi \left(\left(\frac{d_2}{2} \right)^2 - \left(\frac{d_1}{2} \right)^2 \right)}$$

$$d = \frac{d_1}{2} - \sqrt{\left(\frac{d_1}{2} \right)^2 - \frac{a^2 \left(\left(\frac{d_2}{2} \right)^2 - \left(\frac{d_1}{2} \right)^2 \right)}{\left(\frac{d_v}{2} \right)^2 - a^2}} = 0,0243 \text{ mm} = \underline{\underline{24,3 \mu\text{m}}}$$

(U/15/6/04/2)

Enorodovno svetlobno vlakno izdelamo s tehnologijo MCVD tako, da v notranjost cevi iz čistega kremenovega stekla $n_2=1,46$ nanese plast z dodatkom germanijevega oksida. Izračunajte debelino nanese plasti d in lomni količnik n_1 , če znaša notranji premer kremenove cevi $2r_1=15$ mm, zunanji premer kremenove cevi $2r_2=25$ mm. Končni izdelek mora imeti zunanji premer $2r=125$ μm , numerično aperturo $NA=0,08$ ter mejno valovno dolžino enorodovnega delovanja $\lambda_0=1,27$ μm . Difuzijo germanija pri vlečenju vlakna zanemarimo.

$$V = 2,405 = k_0 a NA = \frac{2\pi}{\lambda_0} a NA$$

$$a = \frac{V \cdot \lambda_0}{2\pi \cdot NA} = \frac{2,405 \cdot 1,27 \cdot 10^{-6} \text{ m}}{2\pi \cdot 0,08} = \underline{6,08 \mu\text{m}}$$

$$n_1 = \sqrt{NA^2 + n_2^2} = \underline{1,4622}$$

Enaka razmerja površin:

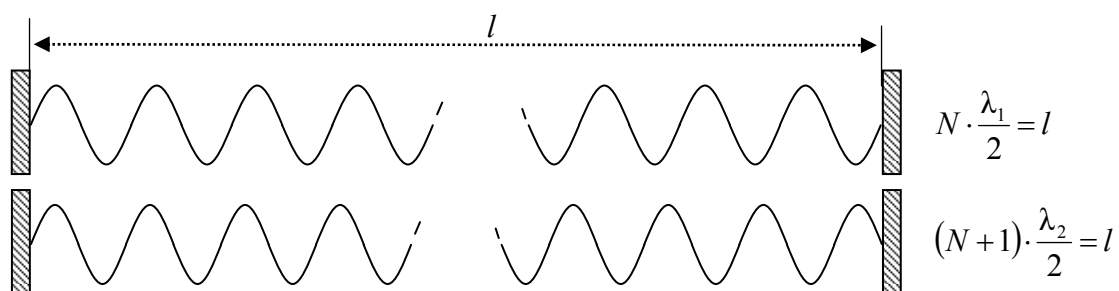
$$\frac{A_{jedra}}{A_{obloga}} = \frac{\pi a^2}{\pi(r^2 - a^2)} = \frac{\pi(r_1^2 - (r_1 - d)^2)}{\pi(r_2^2 - r_1^2)}$$

$$d = r_1 - \sqrt{r_1^2 - \frac{a^2(r_2^2 - r_1^2)}{r^2 - a^2}} = 0,0639 \text{ mm} = \underline{\underline{63,9 \mu\text{m}}}$$

12. Spekter laserja

(V/9/4/99/3)

Razdalja med zrcali helij-neonske laserske cevi (dolžina cevi) znaša $l=320$ mm. Izračunajte frekvenčni razmak med sosednjima spektralnima črtama laserja, ko cev niha na več vzdolžnih rodovih! Lomni količnik razredčenega plina v cevi je zelo blizu enote, cev niha samo na osnovnem prečnem rodu.



$$\Delta f = f_2 - f_1 = \frac{c}{\lambda_2} - \frac{c}{\lambda_1}$$

$$\Delta f = c \left(\frac{N+1}{2l} - \frac{N}{2l} \right)$$

$$\Delta f = \frac{c}{2l} = \frac{c_0}{2ln} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{2 \cdot 0,32 \text{ m} \cdot 1} = \underline{\underline{468,75 \text{ MHz}}}$$

(V/29/9/04/3)

Polarizirana HeNe laserska cev oddaja svetlobo z valovno dolžino $\lambda_0=632,8$ nm (v praznem prostoru). S hitro fotodiodo opazujemo utripanje moči s frekvenco $f=450$ MHz in višjimi harmoniki te frekvence. Izračunajte dolžino cevi l (razdaljo med zrcali), če upoštevamo, da je lomni količnik ionizirane plinske zmesi zelo blizu enote! ($c_0=3 \cdot 10^8$ m/s).

$$l = \frac{c}{2fn} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{2 \cdot 450 \text{ MHz} \cdot 1} = 0,333 \text{ m} = \underline{\underline{33,3 \text{ cm}}}$$

(V/9/6/99/3)

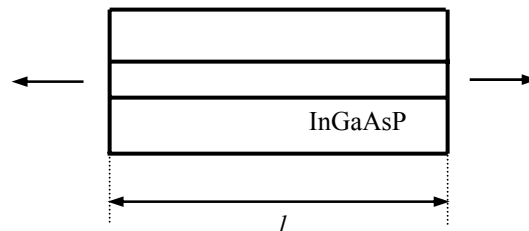
Polprevodniški laser za nazivno valovno dolžino $\lambda_0=1,3 \mu\text{m}$ (v praznem prostoru) ima Fabry-Perot-ov resonator dolžine $l=200 \mu\text{m}$. Izračunajte razmak med sosednjima spektralnima črtama ($\Delta\lambda$), ko laser niha na več vzdolžnih rodovih! Lomni količnik polprevodnika InGaAsP znaša $n=3,7$.

$$\Delta f = \frac{c}{2l} = \frac{c_0}{2ln} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{2 \cdot 200 \cdot 10^{-6} \text{ m} \cdot 3,7} = \underline{202,7 \text{ GHz}}$$

$$\Delta\lambda = \lambda_0 \frac{\Delta f}{f_0} = \frac{\lambda_0^2}{c_0} \Delta f = \frac{(1,3 \cdot 10^{-6} \text{ m})^2}{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}} \cdot 202,7 \cdot 10^9 \text{ s}^{-1} = \underline{1,142 \text{ nm}}$$

(V/15/2/01/3)

Polprevodniški laser za valovno dolžino $\lambda=1,3 \mu\text{m}$ v praznem prostoru je izdelan iz polprevodnika na osnovi InGaAsP s povprečnim lomnim količnikom $n=3,7$. Izračunajte število vzdolžnih rodov, na katerih hkrati niha laser, če znaša dolžina čipa (razdalja med zrcali) $l=0,3 \text{ mm}$ ter širina optičnega spektra $\Delta\lambda=0,5 \text{ nm}$!



$$f = \frac{c_0}{\lambda} \rightarrow \frac{df}{d\lambda} = -\frac{c_0}{\lambda^2} \rightarrow \Delta f = \frac{c_0}{\lambda^2} \cdot \Delta\lambda = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{(1,3 \cdot 10^{-6} \text{ m})^2} \cdot 0,5 \cdot 10^{-9} \text{ m} = \underline{88,8 \text{ GHz}}$$

$f_0 \equiv$ razmik med rodovi

$$f = mf_0 = m \cdot \frac{c}{2l} = m \cdot \frac{c_0}{2ln} \rightarrow f_0 = \frac{c_0}{2ln} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{2 \cdot 0,3 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot 3,7} = \underline{135,1 \text{ GHz}}$$

$$N = \frac{\Delta f}{f_0} = \frac{88,8 \text{ GHz}}{135,1 \text{ GHz}} = \underline{0,657 < 1}$$

Laser niha na enem rodu!

(U/15/2/07/3)

Polprevodniški laser niha na osrednji valovni dolžini $\lambda=1550$ nm, izmerjena širina spektra laserske svetlobe pa znaša $\Delta\lambda=0,0003$ nm. Na koliko različnih vzdolžnih rodovih N niha laser, če znaša dolžina čipa $l=0,5$ mm in je povprečni lomni količnik polprevodnika $n=3,7$?

$$\Delta f_{\text{spektra}} = \frac{c_0}{\lambda^2} \cdot \Delta\lambda = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{(1,55 \cdot 10^{-6} \text{ m})^2} \cdot 0,3 \cdot 10^{-12} \text{ m} = \underline{\underline{37,5 \text{ GHz}}}$$

$$\Delta f_{\text{rodov}} = \frac{c_0}{2 \cdot l \cdot n} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{2 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot 3,7} = \underline{\underline{816 \text{ GHz}}}$$

$$\Delta f_{\text{rodov}} \gg \Delta f_{\text{spektra}} \quad \text{Laser niha na enem rodu!}$$

(V/26/6/02/3)

Polprevodniški laser (FP resonator) za valovno dolžino $\lambda=1,3$ μm niha na več vzdolžnih TE rodovih. Pri kateri frekvenci f dobimo največji modulacijski šum zaradi preskakovanja laserja med rodovi, če je dolžina laserskega čipa $l=1$ mm in znaša povprečni lomni količnik valovoda $n=3,7$? ($c=3 \cdot 10^8$ m/s)

$$f_{\text{opt}} = m \frac{c}{2l} = m \frac{c_0}{2ln} \rightarrow f = \frac{c_0}{2ln} = \underline{\underline{40,54 \text{ GHz}}}$$

(V/22/1/03/3)

GaAlAs polprevodniški laser za osrednjo valovno dolžino $\lambda=850$ nm vsebuje Fabry-Perotov resonator, kjer so zrcala kar stranice čipa. Dolžina laserskega čipa znaša $l=0,4$ mm, srednji lomni količnik valovoda je $n=3,7$. Izračunajte širino spektra laserske svetlobe $\Delta\lambda$, če laser istočasno niha na $N=10$ vzdolžnih rodovih! ($c=3 \cdot 10^8$ m/s)

Širina spektra laserske svetlobe podana v THz znaša:

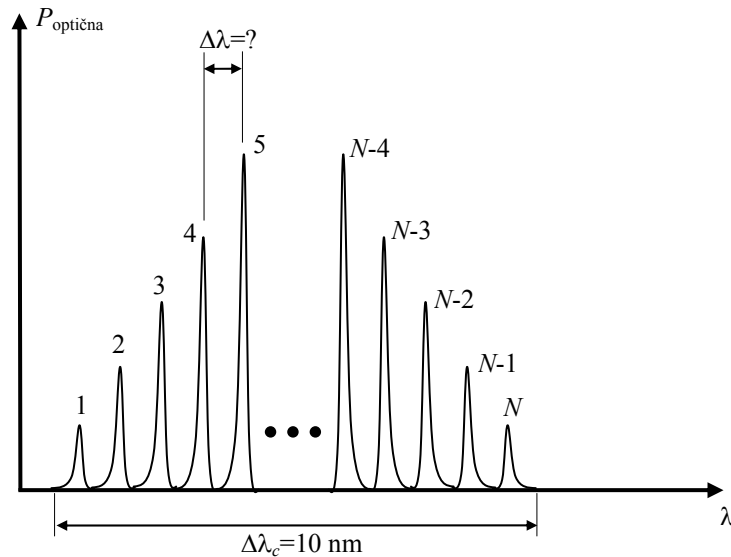
$$\Delta f = N \frac{c_0}{2ln} = \underline{\underline{1,014 \text{ THz}}}$$

λ in $\Delta\lambda$ se navajajo v praznem prostoru!

$$\Delta\lambda = \Delta f \frac{\lambda^2}{c_0} = \underline{\underline{2,44 \text{ nm}}}$$

(U/23/9/98/3)

Polprevodniški laser za nazivno valovno dolžino $\lambda=1300$ nm (v praznem prostoru) vsebuje Fabry-Perot-ov resonator dolžine $l=300$ μm . Izračunajte razmak v nm ($\Delta\lambda$) med sosednjima spektralnima črtama. Resonator je dovolj ozek, da laser niha samo na vzdolžnih rodovih. Lomni količnik polprevodnika InGaAsP znaša $n=3,7$. Na koliko spektralnih črtah niha laser, ko znaša celotna širina izhodnega spektra $\Delta\lambda_c=10$ nm?



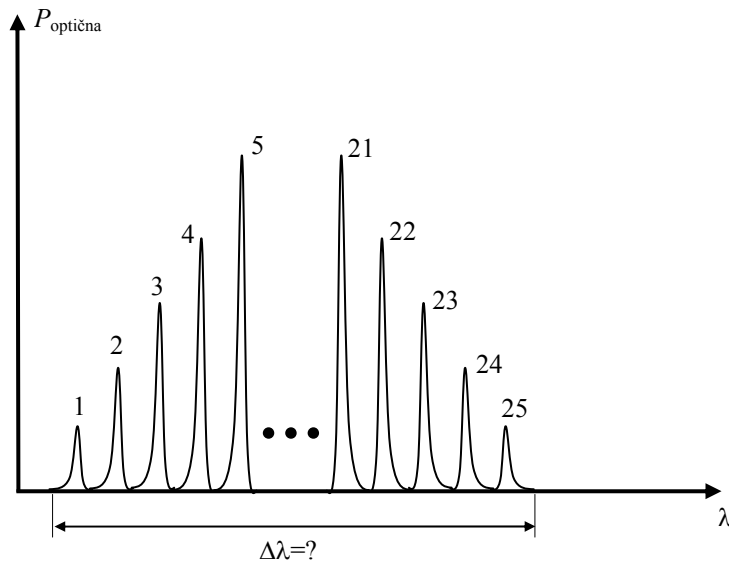
$$\Delta f = \frac{c}{2l} = \frac{c_0}{2l n} = \underline{\underline{135 \text{ GHz}}}$$

$$\left| \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \right| = \left| \frac{\Delta f}{f} \right| \rightarrow \Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{c_0} \cdot \Delta f = \underline{\underline{0,76 \text{ nm}}}$$

$$N = \frac{\Delta\lambda_c}{\Delta\lambda} = \underline{\underline{13}}$$

(U/24/3/00/3)

Izračunajte širino spektra $\Delta\lambda$ polprevodniškega laserja s Fabry-Perot-ovim resonatorjem dolžine $l=200\ \mu\text{m}$! Laser deluje na osrednji valovni dolžini $\lambda=1,3\ \mu\text{m}$ in niha na $N=25$ vzdolžnih rodovih. Lomni količnik polprevodnika laserskega čipa znaša $n=3,7$.



$$\Delta f = N \cdot \frac{c_0}{n \cdot 2l} = 25 \cdot \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{3,7 \cdot 2 \cdot 200 \cdot 10^{-6} \text{ m}} = \underline{5,07 \text{ THz}}$$

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{c_0} \cdot \Delta f = \frac{(1,3 \cdot 10^{-6} \text{ m})^2}{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}} \cdot 5,07 \cdot 10^{12} \text{ /s} = \underline{\underline{28,5 \text{ nm}}}$$

(U/13/6/07/3)

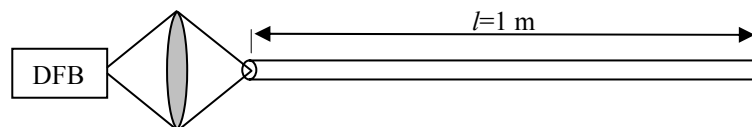
Polprevodniški FP laser niha na $N=11$ rodovih pri osrednji valovni dolžini $\lambda=1310$ nm. Izračunajte vzdolžno koherenčno dolžino d laserske svetlobe, če znaša dolžina rezonatorja $l=350$ μm v polprevodniku z lomnim količnikom $n=3,7$! Vsi rodovi imajo enako prečno porazdelitev polja (en sam prečni rod). ($c=3\cdot 10^8$ m/s)

$$\Delta f = N \cdot \frac{c_0}{n \cdot 2l} = 11 \cdot \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{3,7 \cdot 2 \cdot 350 \cdot 10^{-6} \text{ m}} = \underline{1,274 \text{ THz}}$$

$$d = \frac{c_0}{\Delta f} = 236 \text{ } \mu\text{m} = \underline{0,236 \text{ mm}}$$

(U/19/12/03/3)

Polprevodniški DFB laser za nazivno valovno dolžino $\lambda_0=1550$ nm je sklopljen z lečami na izhodno svetlobno vlakno brez optičnega izolatorja. Določite razdaljo med sosednjima rodovoma $\Delta\lambda$, med katerima preskakuje laser zaradi delnega odboja svetlobe na konektorskem spoju vlaken na razdalji $l=1$ m od laserja! ($c=3\cdot 10^8$ m/s, $n_{\text{jedra}}=1,46$)



$$\Delta f = \frac{c_0}{2l \cdot n_{\text{jedra}}} = \underline{102,7 \text{ MHz}}$$

$$\Delta\lambda = \Delta f \cdot \frac{\lambda_0^2}{c_0} = \underline{8,23 \cdot 10^{-13} \text{ m} = 0,823 \text{ pm}}$$

(V/22/1/02/2)

Polprevodniški DFB laser niha na eni sami spektralni črti širine $\Delta\lambda=0,4$ pm pri osrednji valovni dolžini $\lambda_0=1550$ nm (v praznem prostoru, $c=3\cdot 10^8$ m/s). Izračunajte osrednjo frekvenco delovanja laserja f_0 , širino frekvenčnega spektra Δf ter koherentno dolžino svetlobe l .

$$f_0 = \frac{c_0}{\lambda_0} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{1550 \cdot 10^{-9} \text{ m}} = \underline{\underline{193,5 \text{ THz}}}$$

$$\Delta f = \frac{c_0 \Delta \lambda}{\lambda_0^2} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s} \cdot 0,4 \cdot 10^{-12} \text{ m}}{(1550 \cdot 10^{-9} \text{ m})^2} = \underline{\underline{49,9 \text{ MHz}}}$$

$$l = \frac{c_0}{\Delta f} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{49,9 \cdot 10^6 / \text{s}} = \underline{\underline{6,01 \text{ m}}}$$

(V/2/2/04/3)

InGaAsP polprevodniški laser za osrednjo valovno dolžino $\lambda=1320$ nm vsebuje Fabry-Perotov rezonator, kjer so zrcala kar stranice čipa. Dolžina laserskega čipa znaša $l=550$ μm , srednji lomni količnik valovoda je $n=3,6$. Izračunajte vzdolžno koherentno dolžino d laserske svetlobe, če laser istočasno niha na $N=7$ vzdolžnih rodovih! ($c=3\cdot 10^8$ m/s)

$$\Delta f = N \frac{c_0}{2ln} \qquad d = \frac{c_0}{\Delta f} = \frac{2ln}{N} = \frac{2 \cdot 550 \mu\text{m} \cdot 3,6}{7} = \underline{\underline{566 \mu\text{m}}}$$

(U/15/6/04/3)

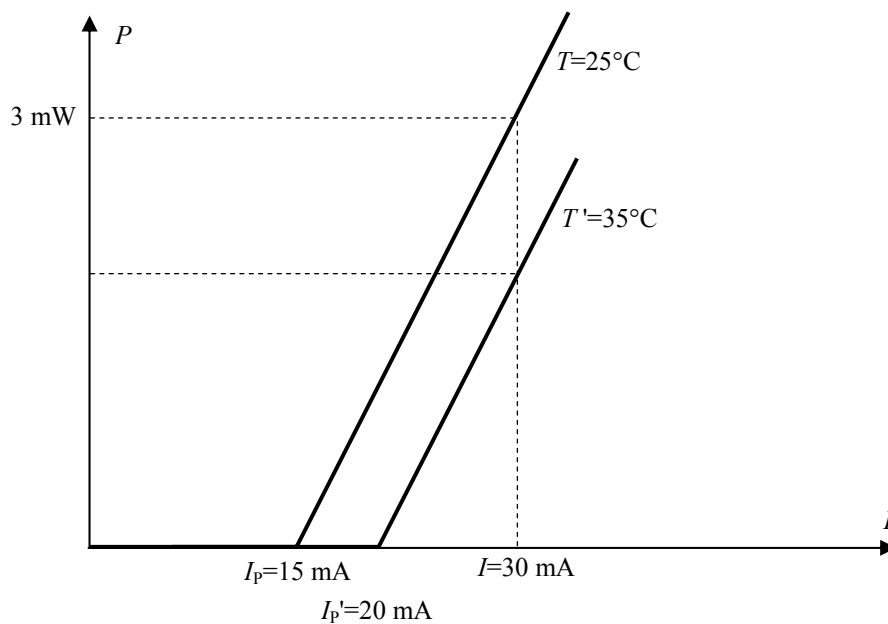
Polprevodniški laser s porazdeljeno povratno vezavo (DFB) ima vgrajeni dve zrcali v obliki uklonskih mrežic. Izračunajte periodo uklonske mrežice d (razdaljo na kateri se vzorec dopiranja ponovi), če znaša povprečni lomni količnik valovoda $n=3,5$. Laser naj niha na enem samem vzdolžnem rodu na frekvenci $f=194,7$ THz. ($c_0=3\cdot 10^8$ m/s)

$$d = \frac{\lambda}{2} = \frac{\lambda_0}{2n} = \frac{c_0}{2nf} = \underline{\underline{0,2201 \mu\text{m} = 220,1 \text{ nm}}}$$

13. Temperaturna odvisnost laserja

(V/24/3/00/3)

Polprevodniški laser ima pri $T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$ pragovni tok $I_p=15\text{ mA}$, ki se pri $T'=35\text{ }^{\circ}\text{C}$ poveča na $I_p'=20\text{ mA}$. Laser sicer krmilimo s konstantnim tokom $I=30\text{ mA}$. Kolikšno moč P' pričakujemo iz laserja pri $T'=35\text{ }^{\circ}\text{C}$, če daje laser moč $P=3\text{ mW}$ pri $T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$?



$$\left. \begin{aligned} P &= \alpha(I - I_p); I \geq I_p \\ P' &= \alpha(I - I_p'); I \geq I_p' \end{aligned} \right\} \frac{P'}{P} = \frac{I - I_p'}{I - I_p}$$

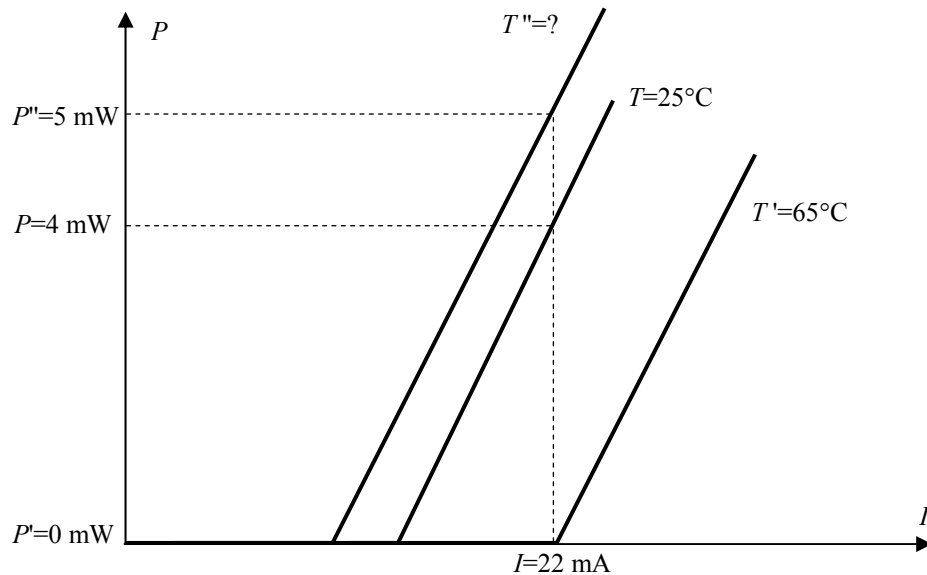
$$P' = P \frac{I - I_p'}{I - I_p} = 3\text{ mW} \cdot \frac{30\text{ mA} - 20\text{ mA}}{30\text{ mA} - 15\text{ mA}} = \underline{\underline{2\text{ mW}}}$$

Fabry-Perotov polprevodniški laser daje pri toku $I_1=20\text{ mA}$ izhodno moč $P_1=0\text{ dBm}$, pri toku $I_2=25\text{ mA}$ pa izhodno moč $P_2=7\text{ dBm}$. Izračunajte pragovni tok I_p , če ostane med poskusom temperatura laserja nespremenjena in enaka sobni temperaturi $T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$.

$$P_p = \frac{P_2 I_1 - P_1 I_2}{P_2 - P_1} = \frac{5\text{ mW} \cdot 20\text{ mA} - 1\text{ mW} \cdot 25\text{ mA}}{5\text{ mW} - 1\text{ mW}} = \underline{\underline{18,75\text{ mA}}}$$

(V/11/10/02/3)

Pri sobni temperaturi $T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$ in toku $I=22\text{ mA}$ daje polprevodniški laser nazivno izhodno moč $P=4\text{ mW}$. Izhodna moč laserja pade na zelo majhno vrednost pri temperaturi $T'=65\text{ }^{\circ}\text{C}$ pri nespremenjenem krmilnem toku. Pri kateri temperaturi laserja T'' dobimo z istim tokom izhodno moč $P''=5\text{ mW}$?



$$P \approx k(I - I_p(T))$$

$$I_p(T) \approx aT + b$$

$$P \approx k(I - aT - b) = kI - kb - kaT = \alpha - \beta T \rightarrow \begin{cases} P = 4\text{ mW} = \alpha - \beta \cdot 25\text{ }^{\circ}\text{C} \\ P' = 0\text{ mW} = \alpha - \beta \cdot 65\text{ }^{\circ}\text{C} \end{cases} \left\{ \begin{array}{l} \beta = 0,1\text{ mW}/^{\circ}\text{C} \\ \alpha = 6,5\text{ mW} \end{array} \right.$$

$$P'' = 5\text{ mW} = 6,5\text{ mW} - 0,1\text{ mW}/^{\circ}\text{C} \cdot T'' \rightarrow \underline{\underline{T'' = 15\text{ }^{\circ}\text{C}}}$$

(U/9/9/09/3)

Valovno dolžino DFB laserja uglašujemo s temperaturo polprevodniškega čipa preko vgrajene Peltier-jeve toplotne črpalke. Pri temperaturi $T_1=0^\circ\text{C}$ laser niha na valovni dolžini $\lambda_1=1552\text{ nm}$ nad pragovnim tokom $I_{p1}=15\text{ mA}$. Pri temperaturi $T_2=50^\circ\text{C}$ laser niha na valovni dolžini $\lambda_2=1556\text{ nm}$ nad pragovnim tokom $I_{p2}=25\text{ mA}$. Kolikšen je pragovni tok $I_{p3}=?$ laserja pri valovni dolžini $\lambda_3=1555\text{ nm}$, če predpostavimo linearno odvisnost vseh veličin?

$$\lambda(T) = aT + b \quad T_1 = 0^\circ\text{C} \Rightarrow b = 1552\text{ nm}$$

$$T_2 = 50^\circ\text{C} \Rightarrow a = \frac{\lambda_2 - b}{T_2} = \frac{1556\text{ nm} - 1552\text{ nm}}{50^\circ\text{C}} = \frac{4\text{ nm}}{50^\circ\text{C}} = 0,08\text{ nm}/^\circ\text{C}$$

$$T_3 = \frac{\lambda_3 - b}{a} = \frac{1555\text{ nm} - 1552\text{ nm}}{0,08\text{ nm}/^\circ\text{C}} = \frac{3\text{ nm}}{0,08\text{ nm}/^\circ\text{C}} = 37,5^\circ\text{C}$$

$$I_p(T) = cT + d \quad T_1 = 0^\circ\text{C} \Rightarrow d = 15\text{ mA}$$

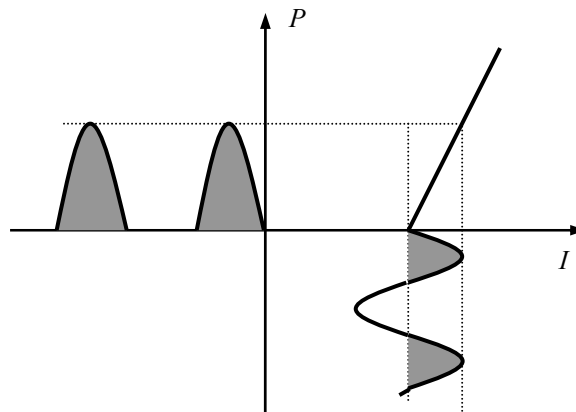
$$T_2 = 50^\circ\text{C} \Rightarrow c = \frac{I_{p2} - d}{T_2} = \frac{25\text{ mA} - 15\text{ mA}}{50^\circ\text{C}} = \frac{10\text{ mA}}{50^\circ\text{C}} = 0,2\text{ mA}/^\circ\text{C}$$

$$I_{p3}(T_3) = cT_3 + d = 0,2\text{ mA}/^\circ\text{C} \cdot 37,5^\circ\text{C} + 15\text{ mA} = \underline{\underline{22,5\text{ mA}}}$$

14. Laserji splošno

(V/5/7/00/3)

Polprevodniški laser ima pragovni tok $I_p=20$ mA in daje pri toku $I_0=35$ mA nazivno izhodno moč $P_0=3$ mW. Izračunajte povprečno moč optičnega oddajnika \bar{P} , če enosmerno delovno točko nastavimo na prag laserja ter dodamo sinusni izmenični modulacijski tok $I_{\text{eff}}=10$ mA!



$$P = \alpha \cdot (I_0 - I_p)$$

$$\alpha = \frac{P_0}{I_0 - I_p} = \frac{3 \text{ mW}}{35 \text{ mA} - 20 \text{ mA}} = \underline{0,2 \text{ W/A}}$$

$$\bar{P} = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi I_{\text{eff}} \sqrt{2} \sin(\omega t) \alpha d(\omega t) = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot I_{\text{eff}} \alpha = \underline{\underline{0,9 \text{ mW}}}$$

(V/20/9/00/3)

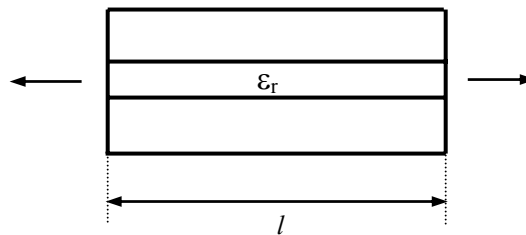
Določite izkoristek η svetleče diode, ki daje izhodno svetlobno moč $P_0=100$ μW na povprečni valovni dolžini $\lambda=900$ nm! Diodo krmilimo s tokom $I=30$ mA, glavni padca napetosti dobimo na PN spoju, ostale padce lahko zanemarimo. ($c=3 \cdot 10^8$ m/s, $h=6,624 \cdot 10^{-34}$ Js)

$$P_e = UI = \frac{W}{|Q_e|} I = \frac{hf}{|Q_e|} I = \frac{hcI}{\lambda|Q_e|} = \frac{6,624 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ m/s} \cdot 30 \cdot 10^{-3} \text{ A}}{0,9 \cdot 10^{-6} \text{ m} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ As}} = \underline{\underline{41,4 \text{ mW}}}$$

$$\eta = \frac{P_0}{P_e} = \frac{0,1 \text{ mW}}{41,4 \text{ mW}} = \underline{\underline{0,242 \%}}$$

(V/25/5/01/3)

Polprevodniški laser vsebuje Fabry-Perotov resonator, kjer predstavljata zrcali kar odbojnosti polprevodnik/zrak na mejnih ploskvah čipa. Izračunajte potrebno dolžino l valovoda v čipu, da naprava začne delovati kot laser! Dielektrična konstanta polprevodnika znaša $\epsilon_r=14$ za svetlobo z valovno dolžino $\lambda=1,3 \mu\text{m}$. Lasersko ojačenje v valovodu pri izbranem delovnem toku doseže $G=5000 \text{ dB/m}$ za TE polarizacijo.



$$n = \sqrt{\epsilon_r} = \underline{3,742}$$

$$\Gamma_{\text{TE}} = \frac{1-n}{1+n} = \underline{-0,578}$$

$$a_{\text{dB}} = 10 \log |\Gamma_{\text{TE}}|^2 = \underline{-4,758 \text{ dB}}$$

$$2lG + 2a_{\text{dB}} = 0 \rightarrow l = -\frac{a_{\text{dB}}}{G} = \underline{\underline{0,952 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 0,952 \text{ mm}}}$$

(V/19/9/01/3)

Določite izkoristek η polprevodniškega laserja s Fabry-Perotovim resonatorjem, ki daje pri valovni dolžini $\lambda=780 \text{ nm}$ izhodno moč $P_0=3 \text{ mW}$ skozi prednje okno ohišja! Laser krmilimo s tokom $I=50 \text{ mA}$, padcu napetosti na polprevodniškem spoju pa se pridruži še padec na upornosti elektrod, ki znaša $R=5 \Omega$. ($c=3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$, $h=6,624 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$)

$$W = h \frac{c}{\lambda} = |Q_e| U \rightarrow U = \frac{hc}{\lambda |Q_e|} = \underline{1,592 \text{ V}}$$

$$P_e = IU + I^2 R = 79,6 \text{ mW} + 12,5 \text{ mW} = \underline{\underline{92,1 \text{ mW}}}$$

$$\eta = \frac{P_0}{P_e} = \underline{\underline{3,3 \%}}$$

(V/14/3/03/3)

Izračunajte največjo dopustno moč polprevodniškega laserja P_{\max} , če predstavlja omejitev električni preboj v zraku na površini izstopne ploskvice $E_{\max}=1 \cdot 10^6$ V/m! Izstopna ploskvice seva kot odprtina širine $w=6$ μm in višine $h=2$ μm . Izračun poenostavimo z upoštevanjem, da je izstopna ploskvice približno enakomerno osvetljena z osnovnim TE rododom. ($Z_0=377$ Ω)

$$S = \frac{|E|^2}{2Z_0} \quad P = SA = Sw h$$

$$P_{\max} = \frac{|E_{\max}|^2 wh}{2Z_0} = \frac{(10^6 \text{ V/m})^2 \cdot 6 \cdot 10^{-6} \text{ m} \cdot 2 \cdot 10^{-6} \text{ m}}{2 \cdot 377 \Omega} = \underline{\underline{15,9 \text{ mW}}}$$

(V/18/6/03/3)

HeNe laser vsebuje kapilaro dolžine $l=150$ mm in dve selektivni zrcali za valovno dolžino $\lambda=632,8$ nm z odbojnostima $\Gamma_1=0,98$ in $\Gamma_2=0,995$. Določite ojačenje plinske zmesi dG/dz na enoto dolžine (v dB/m), ko laser ravno začne nihati!

$$\frac{dG}{dz} = \frac{1}{2l} (-20 \log(\Gamma_1 \Gamma_2)) = \frac{1}{0,3 \text{ m}} (-20 \log(0,98 \cdot 0,995)) = \underline{\underline{0,73 \text{ dB/m}}}$$

(V/24/9/03/3)

Svetlobni oddajnik vsebuje neposredno moduliran laser in doseže ugasno razmerje $a=10$ dB. Izračunajte za kolikšno dolžino Δl se zmanjša domet zveze zaradi končnega ugasnega razmerja oddajnika, če v sprejemniku prevladuje toplotni šum elektronike, v primerjavi z idealnim oddajnikom enake vršne moči (enice)! Slabljenje vlakna znaša 0,35 dB/km pri valovni dolžini $\lambda=1,3$ μm .

$$a = 10 \text{ dB} = 10 \quad P_0 = \frac{P_1}{a}$$

$$\frac{(P_1 - 0)}{(P_1 - P_0)} = \frac{P_1}{P_1 - \frac{P_1}{a}} = \frac{a}{a-1} = \frac{10}{9} = 1,1\bar{1} = \underline{\underline{0,46 \text{ dB}}}$$

$$\Delta l = \frac{0,46 \text{ dB}}{0,35 \text{ dB/km}} = \underline{\underline{1,31 \text{ km}}}$$

(U/5/7/00/3)

Sklopnik z dvema enorodovnima vlaknoma ima pri valovni dolžini svetlobe $\lambda=1550$ nm utripno dolžino $\Lambda=10$ mm. Izračunajte najmanjšo potrebno dolžino sklopnika l , da se v drugo vlakno sklopi $\alpha=1$ % svetlobne moči iz prvega vlakna!

$$P_s = P_v \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos \left(2\pi \cdot \frac{l}{\Lambda} \right) \right)$$

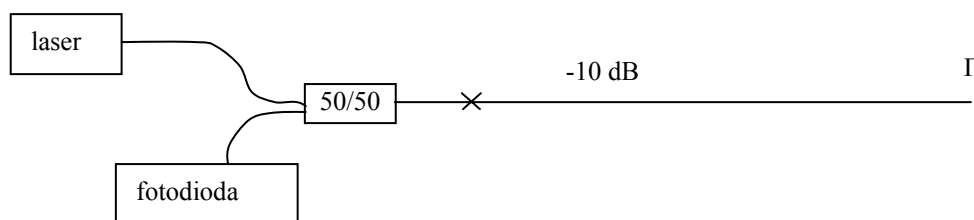
$$l = \frac{\Lambda}{2\pi} \cdot \arccos \left(1 - 2 \cdot \frac{P_s}{P_v} \right) = \frac{10 \text{ mm}}{2\pi} \cdot \arccos(1 - 2 \cdot 0,01)$$

Rezultat, ki ga da arccos moramo pretvoriti v radiane

$$l = \frac{10 \text{ mm}}{2\pi} \cdot 11,5^\circ \cdot \frac{2\pi}{360^\circ} \qquad \underline{\underline{l = 0,319 \text{ mm}}}$$

(U/15/2/01/3)

Optični reflektometer vsebuje polprevodniški laser, ki proizvede svetlobni impulz z močjo $P_0=10$ mW v trajanju $t=100$ ns. Izračunajte število fotonov N , ki priletijo na sprejemno fotodiodo zaradi odboja na prostem koncu merjenega vlakna ($n=1,5$ za steklo), če ima vlakno enosmerno slabljenje $\alpha=10$ dB ter laser in fotodiodo spojimo na merjenec s 50/50 (3 dB) vlakenskim sklopnikom! ($\lambda=1,3$ μm , $h=6,624 \cdot 10^{-34}$ Js)



$$|\Gamma| = \frac{n-1}{n+1} = 0,2$$

$$W_0 = P_0 t = 10 \text{ mW} \cdot 100 \text{ ns} = \underline{1 \text{ nJ}}$$

$$W_s = W_0 \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{10} \cdot |\Gamma|^2 \cdot \frac{1}{10} \cdot \frac{1}{2} = W_0 \cdot \frac{1}{400} \cdot 0,04 = W_0 \cdot 10^{-4} = \underline{0,1 \text{ pJ}}$$

$$N = \frac{W_s}{hf} = \frac{W_s \lambda}{hc_0} = \frac{10^{-13} \text{ J} \cdot 1,3 \cdot 10^{-6} \text{ m}}{6,624 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}} = \underline{\underline{6,54 \cdot 10^5}}$$

(U/9/9/09/5)

Izračunajte povečanje dometa $\Delta l = ?$ (v kilometrih) merilnika OTDR, če povečamo širino svetlobnih impulzov iz $t_1 = 1 \mu\text{s}$ na $t_2 = 5 \mu\text{s}$! Laser merilnika deluje v obeh primerih z isto vršno močjo $P_0 = 1 \text{ W}$ na valovni dolžini $\lambda = 1550 \text{ nm}$. Povprečno slabljenje optičnega kabla vključno s številnimi zvari znaša $a = 0,22 \text{ dB/km}$. ($c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$)

$$\Delta W_{\text{dB}} = 10 \cdot \log_{10} \frac{W_2}{W_1} = 10 \cdot \log_{10} \frac{P_0 \cdot t_2}{P_0 \cdot t_1} = 10 \cdot \log_{10} \frac{5 \mu\text{s}}{1 \mu\text{s}} = 7 \text{ dB}$$

Signal se slabi v obe smeri, zato moramo slabljenje vlakna upoštevati dvakrat.

$$\Delta l = \frac{\Delta W_{\text{dB}}}{2a} = \frac{7 \text{ dB}}{2 \cdot 0,22 \text{ dB/km}} = \underline{\underline{15,9 \text{ km}}}$$

(U/30/6/98/3)

Polprevodniški laser iz mešanice polprevodnikov InGaAsP za valovno dolžino $\lambda = 1,3 \mu\text{m}$ vsebuje dielektrični valovod pravokotne oblike. Svetloba izstopa iz resonatorja skozi pravokotnik višine $h = 3 \mu\text{m}$ in širine $w = 10 \mu\text{m}$. Določite -3 dB širino izstopnega svetlobnega snopa v obeh smereh ob upoštevanju, da je odprtina približno enakomerno osvetljena! (Rešitev enačbe $\sin(x)/x = 0,707$ je $x = 1,392$, člen $(\cos\theta + 1)$ je zanemarljiv.)

$$F(\theta_x, \theta_y) = \frac{\sin\left(\frac{kw}{2} \cos\theta_x\right)}{\frac{kw}{2} \cos\theta_x} \cdot \frac{\sin\left(\frac{kh}{2} \cos\theta_y\right)}{\frac{kh}{2} \cos\theta_y} \rightarrow \begin{aligned} \theta_x &= \arccos \frac{1,392\lambda}{\pi w} = \underline{1,51 \text{ rd}} \\ \theta_y &= \arccos \frac{1,392\lambda}{\pi h} = \underline{1,38 \text{ rd}} \end{aligned}$$

$$\underline{\underline{\alpha_x = \pi - 2\theta_x = 0,115 \text{ rd} = 6,6^\circ}}$$

$$\underline{\underline{\alpha_y = \pi - 2\theta_y = 0,386 \text{ rd} = 22^\circ}}$$

(U/20/6/01/3)

Smerni diagram polprevodniškega laserja z valovno dolžino $\lambda=1,3 \mu\text{m}$ ima -3 dB širino snopa (kot med obema -3 dB točkama izbranega prereza smernega diagrama) $\alpha_1=10^\circ$ v ravnini E in $\alpha_2=50^\circ$ v ravnini H . Izračunajte širino w in višino h izstopne ploskvice ob predpostavki, da je izstopna ploskvice približno enakomerno in sofazno osvetljena! (Rešitev enačbe $\sin(x)/x=0,707$ je $x=1,392$.)

$$F = \underbrace{(1 + \cos \theta)}_{\text{zanemarimo!}} \cdot \frac{\sin\left(\frac{kw}{2} \cdot \cos \theta_x\right)}{\frac{kw}{2} \cdot \cos \theta_x} \cdot \frac{\sin\left(\frac{kh}{2} \cdot \cos \theta_y\right)}{\frac{kh}{2} \cdot \cos \theta_y}$$

-3 dB točka:

$$x = \frac{kw}{2} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\alpha_1}{2}\right) = \frac{kw}{2} \cdot \sin \frac{\alpha_1}{2} \rightarrow w = \frac{\lambda x}{\pi \sin \frac{\alpha_1}{2}} = \frac{1,3 \mu\text{m} \cdot 1,392}{\pi \sin \frac{10^\circ}{2}} = \underline{\underline{6,61 \mu\text{m}}}$$

$$h = \frac{\lambda x}{\pi \sin \frac{\alpha_2}{2}} = \frac{1,3 \mu\text{m} \cdot 1,392}{\pi \sin \frac{50^\circ}{2}} = \underline{\underline{1,36 \mu\text{m}}}$$

(U/18/7/01/3)

Polprevodniški laser vsebuje Fabry-Perot-ov rezonator, kjer predstavljata zrcali kar odbojnosti polprevodnik/zrak na mejnih ploskvah čipa. Izračunajte lasersko ojačenje na enoto dolžine G/l (v dB/m) v čipu dolžine $l=500 \mu\text{m}$, če znaša dielektrična konstanta polprevodnika $\epsilon_r=14$ za svetlobo valovne dolžine $\lambda=1,3 \mu\text{m}$!

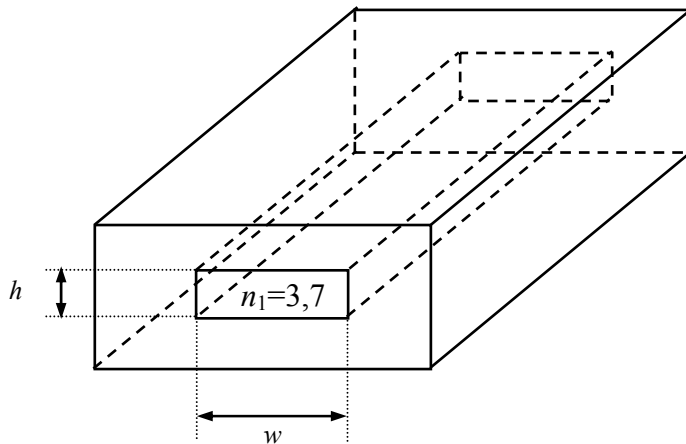
$$\Gamma = \frac{n-1}{n+1} = \frac{\sqrt{\epsilon_r}-1}{\sqrt{\epsilon_r}+1} = \underline{\underline{0,578}}$$

$$|\Gamma|^2 = \underline{\underline{0,334}} = \underline{\underline{-4,758 \text{ dB}}}$$

$$G/l = \frac{-[\Gamma]^2_{\text{dB}}}{l} = \frac{4,758 \text{ dB}}{500 \mu\text{m}} = \underline{\underline{9516 \text{ dB/m}}}$$

(U/26/6/02/3)

Izračunajte električno poljsko jakost E na izstopni ploskvi polprevodniškega laserja širine $w=5 \mu\text{m}$ in višine $h=1,5 \mu\text{m}$. Izhodna moč laserja znaša $P=5 \text{ mW}$ na valovni dolžini $\lambda=850 \text{ nm}$. Lomni količnik polprevodnika je $n_1=3,7$, lomni količnik zraka pa je praktično enak enoti. Pri računu predpostavimo, da je odprtina enakomerno osvetljena z osnovnim TE rodом laserskega resonatorja. ($c=3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$, $Z_0=377 \Omega$)

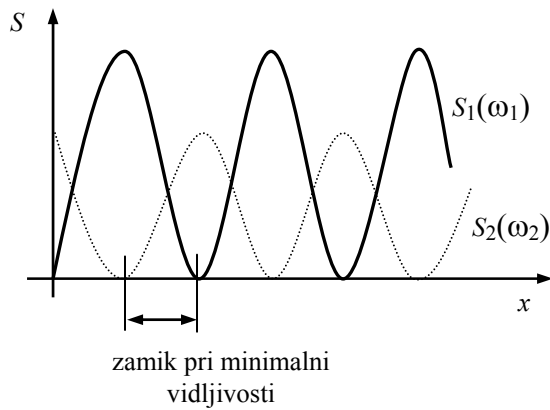


$$|S| = \frac{P}{A} = \frac{P}{wh} = \underline{6,67 \cdot 10^8 \text{ W/m}^2}$$

$$|S| = \frac{1}{2} |\vec{E} \times \vec{H}^*| = \frac{|E|^2}{2Z_0} \rightarrow |E| = \sqrt{2Z_0 |S|} = \underline{\underline{7,09 \cdot 10^5 \text{ V/m}}}$$

(U/18/12/98/3)

Polarizirani helij-neonski laser niha na dveh spektralnih črtah, ki sta razmaknjeni za $\Delta f = 700$ MHz. Izračunajte moči posameznih črt, če znaša skupna izhodna moč laserja $P = 2$ mW! Vidljivost interferenčnega vzorca znaša $V = 0,6$, ko Michelsonov interferometer nastavimo tako, da je vidljivost najmanjša.



$$V = \frac{S_{\max} - S_{\min}}{S_{\max} + S_{\min}} = \frac{S_1 - S_2}{S_1 + S_2} = \frac{P_1 - P_2}{P_1 + P_2} = \frac{P_1 - P_2}{P}$$

$$P_1 - P_2 = VP$$

$$P_1 + P_2 = P = 2 \text{ mW}$$

$$P_1 = \frac{(V+1)P}{2} = \underline{\underline{1,6 \text{ mW}}}$$

$$P_2 = \frac{(1-V)P}{2} = \underline{\underline{0,4 \text{ mW}}}$$

15. Mach-Zehnder-jev elektrooptični amplitudni modulator

(V/9/4/99/4)

Mach-Zehnder-jev elektrooptični modulator na podlagi iz litijevega niobata ima za dano polarizacijo vhodne svetlobe napetost $U_{\text{pi}}=6$ V. Izračunajte napetost na krmilni elektrodi, ko modulator prepušča 80% moči vhodne svetlobe! Izgube v dielektričnih valovodih in sklopnikih zanemarimo.

$$P = \frac{P_0}{2} \left[1 + \cos \left(\pi \frac{U}{U_{\text{pi}}} \right) \right]$$

Iz česar sledi:

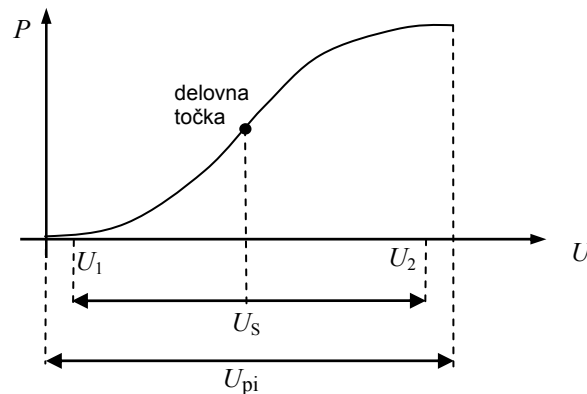
$$U = \frac{U_{\text{pi}}}{\pi} \arccos \left(2 \cdot \frac{P}{P_0} - 1 \right) = \frac{6 \text{ V}}{\pi} \arccos(2 \cdot 0,8 - 1) = \underline{\underline{1,77 \text{ V}}}$$

(V/1/2/00/3)

Optični oddajnik uporablja zunanji elektrooptični modulator z Mach-Zehnder-jevim interferetrom na podlagi LiNbO_3 , ki ima $U_{\text{pi}}=6$ V. Določite ugasno razmerje oddajnika (P_1/P_0) v dB, če modulator krmilimo z modulacijskim signalom $U_S=5$ V (vrh-vrh) in je delovna točka modulatorja nastavljena točno na sredino prenosne funkcije modulatorja!

Karakteristika MZM se zapiše kot dvignjeni kosinus

$$P = P_{\max} \frac{1}{2} \left(1 + \cos \left(\pi \cdot \frac{U}{U_{\text{pi}}} \right) \right)$$



Krmilna napetost v primeru enice znaša $U_1 = \frac{U_{\text{pi}} - U_S}{2} = \underline{0,5 \text{ V}}$

Krmilna napetost v primeru ničle znaša $U_0 = \frac{U_{\text{pi}} + U_S}{2} = \underline{5,5 \text{ V}}$

Izdohni optični moči za primer enice in ničle znašata

$$P_1 = P_{\max} \cdot 0,983$$

$$P_0 = P_{\max} \cdot 0,017$$

$$\left(\frac{P_1}{P_0} \right)_{\text{dB}} = 10 \log \frac{P_1}{P_0} = 10 \log \frac{0,983}{0,017} = \underline{\underline{17,6 \text{ dB}}}$$

(V/19/9/01/4)

Elektrooptični modulator z Mach-Zehnder-jevimi interferometri na podlagi LiNbO_3 ima zaradi netočnosti polarizacije vhodne svetlobe ugasno razmerje (razmerje moči enica/ničla) $a=15$ dB. Izračunajte svetlobno moč enice P_1 in ničle P_0 na izhodu modulatorja, če znaša povprečna svetlobna moč na izhodu modulatorja $P'=1,5$ mW (50 % enic v podatkih)! Modulator krmilimo z najustreznejšim signalom, ki ustreza $U_{\text{piTE}}=7$ V.

$$a = 15 \text{ dB} = 31,6$$

$$P' = \frac{P_1 + P_0}{2} = \frac{aP_0 + P_0}{2} \rightarrow \begin{aligned} P_0 &= \frac{2P'}{a+1} = \underline{\underline{92 \mu\text{W}}} \\ P_1 &= aP_0 = \underline{\underline{2,9 \text{ mW}}} \end{aligned}$$

(V/22/1/02/3)

Elektrooptični Mach-Zehnder modulator na LiNbO_3 podlagi ima za TE polarizacijo $U_{\text{pi}}=7$ V. Izračunajte potrebno izhodno moč P (v dBm) krmilnega električnega ojačevalnika, ki popolnoma izkrmili elektrooptični modulator (največje ugasno razmerje) z električnim signalom pravokotne oblike! Vsi električni priključki so prilagojeni na karakteristično impedanco $Z_k=50 \Omega$, delovno točko modulatorja nastavimo na ločeni "bias" elektrodi.

$$P_{(\text{dBm})} = 10 \log \frac{P}{1 \text{ mW}} = 10 \log \left(\frac{U_{\text{pi}}}{2} \right)^2 \cdot \frac{1}{Z_k} = 10 \log \left(\frac{7 \text{ V}}{2} \right)^2 \cdot \frac{1}{50 \Omega} = \underline{\underline{+ 23,9 \text{ dBm}}}$$

(U/18/12/98/4)

Elektrooptični modulator v obliki Mach-Zehnder-jevega interferometra uporabljamo v oddajniku za analogno kabelsko televizijo. Izračunajte razmerje signal/popačenje, če modulator z $U_{pi}=6$ V krmilimo s sinusnim signalom amplitude $U=100$ mV in predstavlja glavnino popačenja tretji harmonik.

Karakteristika MZM se zapiše kot dvignjeni kosinus $P_i = P_V \cdot \frac{1 + \cos\left(\pi \cdot \frac{U_K}{U_{pi}}\right)}{2}$

Izberemo delovno točko za linearno delovanje: $U_K = u(t) + \frac{U_{pi}}{2}$

$$P_i = P_V \cdot \frac{1 - \sin\left(\frac{\pi}{U_{pi}} \cdot u(t)\right)}{2} = P_V \cdot \frac{1 - \left(\frac{\pi}{U_{pi}} \cdot u(t)\right) + \frac{1}{6} \left(\frac{\pi}{U_{pi}} \cdot u(t)\right)^3 - \dots}{2}$$

Po upoštevanju prvih dveh členov iz razvoja v potenčno vrsto dobimo

$$P_i \approx P_V \cdot \frac{1 - \left(\frac{\pi}{U_{pi}} \cdot u(t)\right) + \frac{1}{6} \left(\frac{\pi}{U_{pi}} \cdot u(t)\right)^3}{2}$$

Krmilni sinusni signal: $u(t) = U \cos \omega t$

$$\frac{\pi}{U_{pi}} \cdot u(t) = \pi \cdot \frac{U}{U_{pi}} \cdot \cos \omega t$$

$$\cos^3 \alpha = \frac{3}{4} \cos \alpha + \frac{1}{4} \cos 3\alpha$$

$$P_i = P_V \left[\frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot \frac{U}{U_{pi}} \cdot \cos \omega t + \frac{1}{12} \left(\frac{3}{4} \cos \omega t + \frac{1}{4} \cos 3\omega t \right) \left(\pi \cdot \frac{U}{U_{pi}} \right)^3 \right]$$

Razmerje amplitud svetlobne moči

$$\frac{P_{LIN}}{P_{3M}} = \frac{\left| -\frac{1}{2} \pi \cdot \frac{U}{U_{pi}} + \frac{1}{16} \left(\pi \cdot \frac{U}{U_{pi}} \right)^3 \right|}{\frac{1}{48} \left(\pi \cdot \frac{U}{U_{pi}} \right)^3} = \frac{24 - 3 \left(\pi \cdot \frac{U}{U_{pi}} \right)^2}{\left(\pi \cdot \frac{U}{U_{pi}} \right)^2} = \underline{\underline{8751}}$$

Elektrooptični modulator v obliki Mach-Zehnderjevega interferometra uporabljamo v oddajniku za analogno kabelsko televizijo. Izračunajte popačenje zaradi drugega harmonika, če modulator z $U_{pi}=6$ V krmilimo s sinusnim signalom amplitude $U=100$ mV.

Karakteristika MZM se zapiše kot dvignjeni kosinus $P_i = P_V \cdot \frac{1 + \cos\left(\pi \cdot \frac{U_K}{U_{pi}}\right)}{2}$

Izberemo delovno točko za linearno delovanje: $U_K = u(t) + \frac{U_{pi}}{2}$

$$P_i = P_V \cdot \frac{1 - \sin\left(\frac{\pi}{U_{pi}} \cdot u(t)\right)}{2} = P_V \cdot \frac{1 - \left(\frac{\pi}{U_{pi}} \cdot u(t)\right) + \frac{1}{6} \left(\frac{\pi}{U_{pi}} \cdot u(t)\right)^3 - \dots}{2}$$

Drugi harmonik ni prisoten!

(U/14/9/99/3)

Mach-Zehnderjev elektrooptični modulator na podlagi iz litijevega niobata ima omejeno pasovno širino zaradi različnih hitrosti valovanja svetlobe in električnega signala na krmilni elektrodi. Določite -3 dB pasovno širino B modulatorja, če odziv modulatorja upade na nič pri modulacijski frekvenci $f=10$ GHz! (Rešitev enačbe $\sin(x)/x=0,707$ je $x=1,392$.) Koliko znaša pri tej frekvenci $U_{pi}(B)$, če je za nizke frekvence $U_{pi}(f=0)=5$ V?

$$d\varphi = \alpha U dl$$

$$\varphi = \alpha U \left| \int_0^l e^{-j\Delta\beta l} dl \right| = \alpha U \frac{\sin(\Delta\beta l/2)}{\Delta\beta l/2} = \alpha U \frac{\sin(\pi f/f_0)}{\pi f/f_0}$$

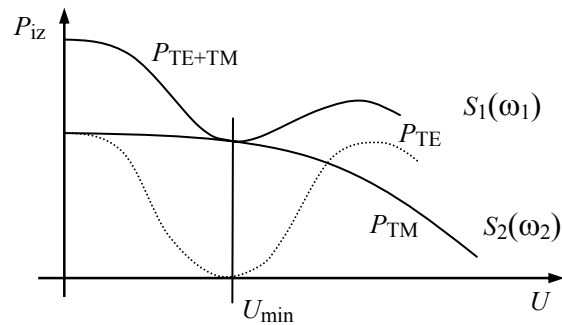
$$f_0 = 10 \text{ GHz}$$

$$\frac{\sin(\pi B/f_0)}{\pi B/f_0} = 0,707 \rightarrow \pi B/f_0 = 1,392 \rightarrow B = \frac{1,392}{\pi} f_0 = \underline{\underline{4,43 \text{ GHz}}}$$

$$U_{\pi}(B) = U_{\pi}(0) \cdot \sqrt{2} = \underline{\underline{7,07 \text{ V}}}$$

(U/20/9/00/3)

Elektrooptični modulator na osnovi Mach-Zehnderjevega interferometra na podlagi iz LiNbO_3 ima $U_{\pi\text{TE}}=6\text{ V}$ in $U_{\pi\text{TM}}=15\text{ V}$. Določite napetost prvega minimuma U_{\min} izhodne moči ter slabljenje svetlobe (v dB) glede na maksimalni prepust pri $U=0\text{ V}$, če modulator krmilimo z idealno krožno polarizirano svetlobo!



Krožna polarizacija:

$$P_{iz} = P_{vh} \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{4} \cos \pi \frac{U}{U_{\pi\text{TE}}} + \frac{1}{4} \cos \pi \frac{U}{U_{\pi\text{TM}}} \right) = P_{vh} \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{4} \cos \pi \frac{U}{6\text{ V}} + \frac{1}{4} \cos \pi \frac{U}{15\text{ V}} \right)$$

$$\frac{dP_{iz}}{dU} = 0 = -\frac{\pi}{24\text{ V}} \cdot \sin \pi \frac{U}{6\text{ V}} - \frac{\pi}{60\text{ V}} \cdot \sin \pi \frac{U}{15\text{ V}}$$

$$x = \pi \frac{U}{6\text{ V}}; \quad 0 = f(x) = \sin x + \frac{2}{5} \sin \frac{2}{5} x; \quad f'(x) = \cos x + \frac{4}{25} \cos \frac{2}{5} x$$

Newton: $x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)}$; $x_0 = \pi = 3,141593$

$$x_1 = 3,541803$$

$$x_2 = 3,548105$$

$$x_3 = 3,548113$$

$$x_4 = 3,548113 \rightarrow U_{\min} = \frac{6\text{ V}}{\pi} x = \underline{\underline{6,776\text{ V}}}$$

$$\frac{P_{\min}}{P_{vh}} = \frac{1}{2} + \frac{1}{4} \cos \pi \frac{U_{\min}}{6\text{ V}} + \frac{1}{4} \cos \pi \frac{U_{\min}}{15\text{ V}} = \frac{1}{2} + \frac{1}{4} \cos x + \frac{1}{4} \cos \frac{2}{5} x = \underline{\underline{0,308117}}$$

$$a = 10 \log 0,308117 = \underline{\underline{-5,11\text{ dB}}}$$

(U/29/3/02/3)

Elektrooptični modulator na osnovi LiNbO_3 ima napetost $U_{\text{pi}}=6,5$ V. Modulator krmilimo z električnim signalom pravilne amplitude ($U_S=6,5$ V vrh-vrh), vendar se delovna točka modulatorja odseli za $U=0,5$ V zaradi spremembe temperature čipa modulatorja. Izračunajte ugasno razmerje (P_1/P_0) modulatorja v takšnih delovnih razmerah!

$$P = P_{\max} \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos \left(\pi \cdot \frac{U}{U_{\text{pi}}} \right) \right)$$

$$U_0 = U_S + U = 7 \text{ V} \rightarrow \underline{P_0 = 0,0145 \cdot P_{\max}}$$

$$U_1 = 0 + U = 0,5 \text{ V} \rightarrow \underline{P_1 = 0,9855 \cdot P_{\max}}$$

$$\underline{\underline{\frac{P_1}{P_0} = 67,97 = 18,4 \text{ dB}}}}$$

(U/18/6/03/3)

Elektrooptični amplitudni modulator z Mach-Zehnder-jevimi interferometri na podlagi iz LiNbO_3 ima pri valovni dolžini $\lambda_0=1550$ nm občutljivosti $U_{\pi\text{TE}}=6$ V in $U_{\pi\text{TM}}=16$ V za obe polarizaciji. Kolikšne občutljivosti $U_{\pi\text{TE}}'$ in $U_{\pi\text{TM}}'$ lahko pričakujemo pri valovni dolžini izvora $\lambda'_0=1300$ nm za isti modulator, če ostanejo elektrooptične lastnosti LiNbO_3 nespremenjene?

$$\Delta\varphi = 2\Delta n \cdot k_0 l = 2\Delta n \cdot \frac{2\pi}{\lambda_0} l$$

$$\Delta n = n_1 E = n_1 \frac{U}{d}$$

$$\Delta\varphi = 2n_1 \cdot \frac{U}{d} \cdot \frac{2\pi}{\lambda_0} l = \alpha \frac{U}{\lambda_0}$$

$$U'_{\pi\text{TE}} = U_{\pi\text{TE}} \frac{\lambda'_0}{\lambda_0} = 6 \text{ V} \cdot \frac{1300 \text{ nm}}{1550 \text{ nm}} = \underline{\underline{5,03 \text{ V}}}$$

$$U'_{\pi\text{TM}} = U_{\pi\text{TM}} \frac{\lambda'_0}{\lambda_0} = 16 \text{ V} \cdot \frac{1300 \text{ nm}}{1550 \text{ nm}} = \underline{\underline{13,42 \text{ V}}}$$

(U/14/3/03/3)

Mach-Zehnder-jev modulator na osnovi LiNbO₃ ima pri valovni dolžini $\lambda=1,55 \mu\text{m}$ občutljivosti $U_{\pi\text{TE}}=6 \text{ V}$ in $U_{\pi\text{TM}}=17 \text{ V}$. Pri kateri napetosti na krmilni elektrodi U upade izhodna svetlobna moč na polovico $P_i=P_{i\text{max}}/2$, če uporabimo kot izvor svetlobe nepolarizirano ojačeno spontano sevanje ASE erbijevga optičnega ojačevalnika?

$$P_{\text{TE}i} = P_{\text{TE}i\text{max}} \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos \left(\pi \frac{U}{U_{\pi\text{TE}}} \right) \right)$$

$$P_{\text{TE}i\text{max}} = P_{\text{TM}i\text{max}} = \frac{1}{2} P_{i\text{max}}$$

$$P_i = P_{i\text{max}} \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{4} \cos \left(\pi \frac{U}{U_{\pi\text{TE}}} \right) + \frac{1}{4} \cos \left(\pi \frac{U}{U_{\pi\text{TM}}} \right) \right) = \frac{1}{2} P_{i\text{max}}$$

$$0 = \cos \left(\pi \frac{U}{U_{\pi\text{TE}}} \right) + \cos \left(\pi \frac{U}{U_{\pi\text{TM}}} \right) = 2 \cos \left(\frac{\pi}{2} \left(\frac{U}{U_{\pi\text{TE}}} + \frac{U}{U_{\pi\text{TM}}} \right) \right) \cos \left(\frac{\pi}{2} \left(\frac{U}{U_{\pi\text{TE}}} - \frac{U}{U_{\pi\text{TM}}} \right) \right)$$

Iz česar sledi prva rešitev za minimalno napetost:

$$\frac{U}{U_{\pi\text{TE}}} + \frac{U}{U_{\pi\text{TM}}} = 1 \rightarrow U = \frac{1}{\frac{1}{U_{\pi\text{TE}}} + \frac{1}{U_{\pi\text{TM}}}} = \underline{\underline{4,435 \text{ V}}}$$

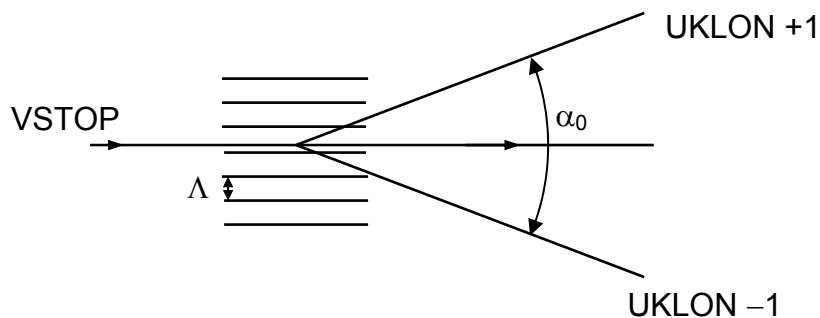
Druga rešitev pa je:

$$\frac{U}{U_{\pi\text{TE}}} - \frac{U}{U_{\pi\text{TM}}} = 1 \rightarrow U = \frac{1}{\frac{1}{U_{\pi\text{TE}}} - \frac{1}{U_{\pi\text{TM}}}} = \underline{\underline{9,27 \text{ V}}}$$

16. Akustooptika

(V/9/6/99/5)

Določite frekvenco zvočnega valovanja v akustooptičnem modulatorju svetlobe, da znaša kot med uklonjenima žarkoma prvega reda $\alpha_0=1^\circ$ (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 ($\lambda_0=632,8$ nm).



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

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

(U/18/7/01/5)

Akustooptični modulator vsebuje kot aktivno snov stekleno kocko z lomnim količnikom $n=1,5$, v kateri se širi zvočno valovanje s hitrostjo $v=3,5$ km/s. Na stekleno kocko je pritrjen piezoelektrični pretvornik, ki ga krmilimo s frekvenco $f=100$ MHz. Izračunajte kot uklonjenega žarka prvega reda (Raman-Nath-ov uklon) v zraku za zeleno svetlobo argonskega laserja z valovno dolžino $\lambda_0=514$ nm!

$$\alpha = \arcsin \frac{\lambda_0}{\Lambda} = \arcsin \frac{\lambda_0 f}{v} = \arcsin \frac{514 \text{ nm} \cdot 100 \cdot 10^6 \text{ Hz}}{3,5 \cdot 10^3 \text{ m/s}} = \underline{\underline{14,7 \text{ mrd} = 0,841^\circ}}$$

(U/24/3/00/5)

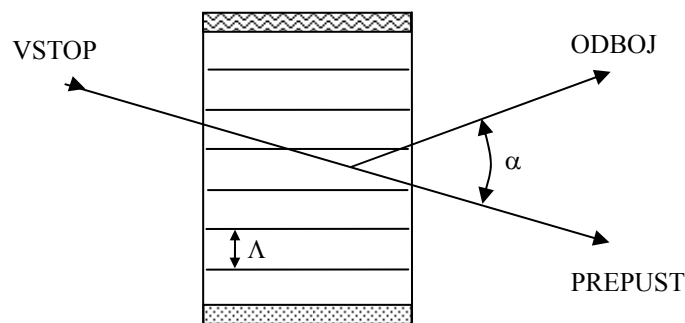
Določite hitrost zvočnega valovanja v v akustooptičnem modulatorju, če se žarka prvega reda uklonita za kot $\alpha=0,1^\circ$. Kot izvor svetlobe uporabimo rdeči HeNe laser z valovno dolžino $\lambda=632,8$ nm, piezoelektrični pretvornik pa krmilimo z radiofrekvenčnim generatorjem s frekvenco $f=12$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

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

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

(U/29/3/02/5)

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



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

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

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

17. Fotodiode

(V/9/6/99/4)

Silicijeva PIN fotodiode ima odzivnost $I/P=0,3$ A/W pri valovni dolžini $\lambda_0=850$ nm (v praznem prostoru). Določite kvantni izkoristek (η) fotodiode! Kolikšna je teoretsko največja možna odzivnost $(I/P)_{\max}$ idealne fotodiode pri navedeni valovni dolžini? ($h=6,624 \cdot 10^{-34}$ Js, $Q_e=-1,6 \cdot 10^{-19}$ As)

$$\left(\frac{I}{P}\right)_{\max} = \frac{|Q_e|}{W_f} = \frac{|Q_e|}{hf_0} = \frac{|Q_e|\lambda_0}{hc_0} = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ As} \cdot 850 \cdot 10^{-9} \text{ m}}{6,624 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}} = \underline{\underline{0,684 \text{ A/W}}}$$

$$\eta = \frac{I/P}{(I/P)_{\max}} = \frac{0,3 \text{ A/W}}{0,684 \text{ A/W}} = \underline{\underline{43,9\%}}$$

(V/5/7/00/4)

Izračunajte kvantni izkoristek η PIN fotodiode, ki daje pri vpadni optični moči $P=-25$ dBm na valovni dolžini $\lambda=1550$ nm enosmerni foto-tok $I=2,2$ μ A! Temni tok fotodiode je zanemarljivo majhen, površina čipa pa je prekrita z antirefleksnim slojem. ($h=6,624 \cdot 10^{-34}$ Js, $c=3 \cdot 10^8$ m/s)

$$P = -25 \text{ dBm} = 10^{\frac{-25 \text{ dBm}}{10}} \text{ mW} = \underline{\underline{3,16 \mu\text{W}}}$$

$$I = \frac{|Q_e|}{W_f} \eta P = \frac{|Q_e| \eta P}{hf} \rightarrow \eta = \frac{Ihc}{|Q_e| P \lambda} = \frac{2,2 \cdot 10^{-6} \text{ A} \cdot 6,624 \cdot 10^{-34} \text{ Js}^2 \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ As} \cdot 3,16 \cdot 10^{-6} \text{ W} \cdot 1,55 \cdot 10^{-6} \text{ m}} = \underline{\underline{55,8\%}}$$

(V/29/9/04/4)

Izračunajte tok I skozi silicijevo fotodiode, na katero vпада svetlobna moč $P=100$ nW z valovno dolžino $\lambda=780$ nm! Površina fotodiode je prekrita z antirefleksnim slojem, kvantni izkoristek fotodiode znaša $\eta=75\%$. Fotodiode je priključena na dovolj nizko zaporno napetost, da je plazovno ojačenje zanemarljivo. Prav tako je zanemarljiv tudi temni tok. ($c=3 \cdot 10^8$ m/s, $h=6,624 \cdot 10^{-34}$ Js, $Q_e=-1,6 \cdot 10^{-19}$ As, $m_e=9,1 \cdot 10^{-31}$ kg)

$$I = \frac{|Q_e|}{W_f} \eta P = \frac{|Q_e| \eta P}{hc} \cdot \lambda = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ As} \cdot 0,75 \cdot 100 \cdot 10^{-9} \cdot 0,78 \cdot 10^{-6} \text{ m}}{6,624 \cdot 10^{-34} \text{ Js}^2 \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}} = 4,71 \cdot 10^{-8} \text{ A} = \underline{\underline{47,1 \text{ nA}}}$$

(V/22/1/02/4)

InGaAs PIN fotodioda ima kvantni izkoristek $\eta=70\%$ in daje pri povprečni vpadni svetlobni moči $P=-35$ dBm enosmerni foto tok $I=0,233$ μ A. Površina čipa fotodiode je prekrita z antirefleksnim slojem, temni tok fotodiode pa je pri dani temperaturi zanemarljivo majhen. Določite valovno dolžino vpadne svetlobe! ($h=6,624\cdot 10^{-34}$ Js, $c=3\cdot 10^8$ m/s, $Q_e=-1,6\cdot 10^{-19}$ As)

$$P = -35 \text{ dBm} = 1 \text{ mW} \cdot 10^{\frac{-35 \text{ dBm}}{10}} = \underline{316 \text{ nW}}$$

$$\frac{P}{I} = \frac{W}{\eta|Q_e|} = \frac{hf}{\eta|Q_e|} = \frac{hc_0}{\lambda_0\eta|Q_e|}$$

$$\lambda_0 = \frac{Ihc_0}{P\eta|Q_e|} = \frac{0,233\cdot 10^{-6} \text{ A} \cdot 6,624\cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 3\cdot 10^8 \text{ m/s}}{316\cdot 10^{-9} \text{ W} \cdot 0,7\cdot 1,6\cdot 10^{-19} \text{ As}}$$

$$\underline{\underline{\lambda_0 = 1308 \text{ nm}}}$$

(V1/2/00/4)

Sprejemniški PIN-FET modul za $C=622$ Mbit/s vsebuje fotodiode s kvantnim izkoristkom $\eta=75\%$ in transimpedančni ojačevalnik z impedanco $Z=1$ k Ω . Določite napetost signala na izhodu ($U_{vrh-vrh}$), če predstavlja logično enico $N=3000$ fotonov valovne dolžine $\lambda=1,3$ μ m, logično ničlo pa odsotnost svetlobe na vhodu sprejemnika! ($h=6,624\cdot 10^{-34}$ Js, $c=3\cdot 10^8$ m/s)

Naboj, ki ga ustvari enica znaša $Q_1 = \eta N|Q_e|$.

Vršna vrednost toka v primeru enice znaša $I_1 = \frac{Q_1}{T} = Q_1 C$.

Iz tega dobimo vršno napetost.

$$U_1 = ZI_1 = \eta N|Q_e| CZ = 0,75 \cdot 3000 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ As} \cdot 622 \cdot 10^6 / \text{s} \cdot 1000 \Omega = 224 \mu\text{V}$$

Napetost v primeru ničle je $\underline{U_0 = 0 \text{ V}}$.

$$U_{vrh-vrh} = U_1 - U_0 = \underline{\underline{224 \mu\text{V}}}$$

(V/24/3/00/4)

Izračunajte faktor plazovnega ojačenja M fotodiode, ki daje pri vhodni svetlobni moči $P=1 \mu\text{W}$ na valovni dolžini $\lambda=1,3 \mu\text{m}$ električni tok $I=10 \mu\text{A}$. Plazovna fotodioda ima brez pritisnjene zaporne napetosti kvantni izkoristek $\eta=0,6$. ($h=6,624 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$, $c=3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$)

$$P = hf \frac{dN}{dt} = h \frac{c}{\lambda} \frac{dN}{dt}$$

$$I = M\eta|Q_e| \frac{dN}{dt} = M\eta|Q_e| \frac{P\lambda}{hc}$$

$$M = \frac{Ihc}{\eta|Q_e|P\lambda} = \frac{10 \cdot 10^{-6} \text{ A} \cdot 6,624 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{0,6 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ As} \cdot 10^{-6} \text{ W} \cdot 1,3 \cdot 10^{-6} \text{ m}} = \underline{\underline{15,9}}$$

(V/20/9/00/4)

Določite optično moč P_0 (v dBm) na vhodu transimpedančnega sprejemnika ($R_t=10 \text{ k}\Omega$), če dobimo na izhodu modula napetost $U=100 \text{ mV}$! Kvantni izkoristek PIN fotodiode znaša $\eta=0,7$ na valovni dolžini $\lambda=1,3 \mu\text{m}$ (v praznem prostoru). ($h=6,624 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$, $c=3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$, $Q_e=-1,6 \cdot 10^{-19} \text{ As}$)

$$I = \frac{U}{R_t} = \frac{0,1 \text{ V}}{10000 \Omega} = \underline{\underline{10 \mu\text{A}}}$$

$$W = hf = \frac{hc}{\lambda}$$

$$I = |Q_e| \frac{dN_e}{dt}$$

$$N_e = \eta N_f$$

$$P_0 = W \frac{dN_f}{dt} = W \cdot \frac{1}{\eta} \cdot \frac{dN_e}{dt} = \frac{hc}{\lambda} \cdot \frac{1}{\eta} \cdot \frac{I}{|Q_e|} = \frac{6,624 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ m/s} \cdot 10 \cdot 10^{-6} \text{ A}}{1,3 \cdot 10^{-6} \text{ m} \cdot 0,7 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ As}}$$

$$\underline{\underline{P_0 = 13,65 \mu\text{W} = -18,6 \text{ dBm}}}$$

(V/15/2/01/4)

Izračunajte izhodno napetost U APD-FET modula, ki vsebuje plazovno fotodiodo s kvantnim izkoristkom $\eta=0,8$ pri valovni dolžini $\lambda_0=1,3 \mu\text{m}$ in transimpedančni ojačevalnik z $R_t=1 \text{ k}\Omega$! Na vhod sprejemnika pripeljemo svetlobno moč $P_0=1 \mu\text{W}$, zaporno napetost na plazovni diodi pa nastavimo za faktor multiplikacije $M=20$. ($h=6,624 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$, $c=3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$, $Q_e=-1,6 \cdot 10^{-19} \text{ As}$)

$$Q = N_e |Q_e| M = N_f \eta |Q_e| M = \frac{W_0}{hf} \eta |Q_e| M = \frac{W_0 \lambda_0 \eta |Q_e| M}{hc_0}$$

$$I = \frac{dQ}{dt} = \frac{\lambda_0 \eta |Q_e| M}{hc_0} \cdot \frac{dW_0}{dt} = \frac{P_0 \lambda_0 \eta |Q_e| M}{hc_0}$$

$$U = IR_t$$

$$U = \frac{P_0 \lambda_0 \eta |Q_e| M R_t}{hc_0} = \frac{10^{-6} \text{ W} \cdot 1,3 \cdot 10^{-6} \text{ m} \cdot 0,8 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ As} \cdot 20 \cdot 10^3 \Omega}{6,624 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}$$

$$\underline{\underline{U = 0,0167 \text{ V} = 16,7 \text{ mV}}}$$

(V/25/5/01/4)

Izračunajte domet r daljinca za televizor, ki ima oddajnik s svetlečo diodo z vršno močjo (enica) $P_0=10 \text{ mW}$ na valovni dolžini $\lambda=900 \text{ nm}$! Sprejemnik je opremljen s fotodiodo s površino $A=1 \text{ mm}^2$ in kvantnim izkoristkom $\eta=0,7$. Fotodioda ima kapacitivnost $C=100 \text{ pF}$ in mora za vsako enico dovesti na vhodne sponke visokoimpedančnega ojačevalnika napetost $U_s=0,25 \text{ mV}$. Bitna hitrost znaša $R=1 \text{ kbit/s}$. ($h=6,624 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$, $c=3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$, $Q_e=-1,6 \cdot 10^{-19} \text{ As}$)

$$Q = CU_s \quad N_e = \frac{Q}{|Q_e|} \quad N_f = \frac{N_e}{\eta}$$

$$W = N_f hf = N_f h \frac{c}{\lambda}$$

$$P_s = WR$$

$$P_s = \frac{CU_s}{\eta |Q_e|} \cdot h \cdot \frac{c}{\lambda} \cdot R = \underline{\underline{4,929 \cdot 10^{-11} \text{ W}}}$$

$$P_s = P_0 \cdot \frac{A}{4\pi r^2} \rightarrow r = \sqrt{\frac{P_0}{P_s} \cdot \frac{A}{4\pi}} = \underline{\underline{4,02 \text{ m}}}$$

(U/9/7/04/4)

Policijski merilnik hitrosti vozil vsebuje laser na valovni dolžini $\lambda=900$ nm z vršno (pulzno) izhodno močjo $P_0=10$ W. Kolikšna mora biti površina A fotodiode v sprejemniku v avtomobilu, da bo ta na razdalji $r=500$ m pravočasno opozoril voznika, naj zmanjša hitrost? Silicijeva fotodioda ima kvantni izkoristek $\eta=80\%$. Sprejemnik še zazna tok $I=10$ μA . Optika merilnika hitrosti osvetli krog premera $d=1$ m na omenjeni razdalji. ($h=6,624\cdot 10^{-34}$ Js, $c=3\cdot 10^8$ m/s, $Q_e=-1,6\cdot 10^{-19}$ As)

$$P_s = \frac{I \cdot h \cdot c_0}{\eta \cdot |Q_e| \cdot \lambda} = 17,25 \mu\text{W}$$

$$A = \frac{P_s}{P} \cdot \pi \left(\frac{d}{2} \right)^2 = \underline{\underline{1,3548 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2}} = \underline{\underline{1,3548 \text{ mm}^2}}$$

(V/26/6/02/4)

Določite skupni faktor množenja elektronov M fotopomnoževalke, ki je opremljena s fotokatodo s kvantnim izkoristkom $\eta=0,2!$ Na fotokatodo vpada $N=1\cdot 10^6$ (milijon) fotonov na sekundo rdeče svetlobe HeNe laserja ($\lambda=632,8$ nm). Anoda fotopomnoževalke vleče električni tok $I_A=1$ mA. ($h=6,624\cdot 10^{-34}$ Js, $c=3\cdot 10^8$ m/s, $Q_e=-1,6\cdot 10^{-19}$ As)

$$I_K = \eta N |Q_e|$$

$$M = \frac{I_A}{I_K} = \frac{I_A}{\eta N |Q_e|} = \underline{\underline{3,125 \cdot 10^{10}}}$$

(V/11/10/02/4)

Optični PIN-FET sprejemniški modul vsebuje električni ojačevalnik s šumno temperaturo $T=300$ K. Skupna kapacitivnost fotodiode in vhoda ojačevalnika znaša $C=2$ pF. Določite število fotonov N , potrebnih za prenos logične enice pri valovni dolžini $\lambda=1,55$ μm , če zahtevamo razmerje $P_{\text{enice}}/P_{\text{\u0177uma}}=30$ na elektri\u010dnem izhodu sprejemnika in znaša kvantni izkoristek PIN fotodiode $\eta=0,7$. ($h=6,624\cdot 10^{-34}$ Js, $c=3\cdot 10^8$ m/s, $Q_e=-1,6\cdot 10^{-19}$ As, $k_B=1,38\cdot 10^{-23}$ J/K)

$$U_{\text{\u0177uma}} \approx \sqrt{\frac{k_B T}{2\pi C}} = \underline{18,15 \mu\text{V}}$$

$$U_{\text{enice}} = U_{\text{\u0177uma}} \sqrt{\frac{P_{\text{enice}}}{P_{\text{\u0177uma}}}} = \underline{99,4 \mu\text{V}}$$

$$U_{\text{enice}} \approx \frac{N\eta|Q_e|}{C} \rightarrow N = \frac{U_{\text{enice}} C}{\eta|Q_e|} = \underline{1775}$$

(V/22/1/03/4)

PIN-FET modul vsebuje fotodiodo s kvantnim izkoristkom $\eta_1=70$ % pri valovni dol\u017einini $\lambda_1=1,3$ μm . Pri tej valovni dol\u017einini zna\u0161a občutljivost sprejemnika $P_1=-35$ dBm za dovolj nizko pogostnost napak *BER*. Kolik\u0161na je občutljivost sprejemnika P_2 na valovni dol\u017einini $\lambda_2=1,55$ μm , kjer kvantni izkoristek fotodiode naraste na $\eta_2=80$ %? Pri ra\u010dunu upo\u0161tevamo, da ve\u010dino \u0161uma povzro\u010da elektri\u010dni oja\u010devalnik, ki sledi fotodiodi. ($h=6,624\cdot 10^{-34}$ Js, $Q_e=-1,6\cdot 10^{-19}$ As)

$$P_1 = \underline{-35 \text{ dBm} = 316 \text{ nW}}$$

$$\left. \begin{array}{l} P_1 = \frac{hc_0}{\lambda_1 \eta_1} \frac{dN_e}{dt} \\ P_2 = \frac{hc_0}{\lambda_2 \eta_2} \frac{dN_e}{dt} \end{array} \right\} P_2 = \frac{\lambda_1 \eta_1}{\lambda_2 \eta_2} P_1 = \underline{\underline{232 \text{ nW} = -36,34 \text{ dBm}}}$$

(V/14/3/03/4)

Izračunajte domet reflektometra OTDR v smislu slabljenja merjenca a (v dB)! Reflektometer vsebuje oddajnik na valovni dolžini $\lambda=1,3 \mu\text{m}$, ki oddaja impulze dolžine $t=200 \text{ ns}$ in moči $P=25 \text{ mW}$. Sprejemnik vsebuje plazovno diodo in električni ojačevalnik, ki omogoča zaznavanje impulzov z $N_s=1000$ fotonov. Impulzi prepotujejo merjenec v obeh smereh in se na koncu merjenca odbijejo na meji steklo ($n=1,46$) / zrak. ($h=6,624 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$)

$$N_0 = \frac{Pt}{hf} = \frac{Pt\lambda}{hc_0} = \underline{3,271 \cdot 10^{10}}$$

$$|\Gamma| = \frac{n-1}{n+1} = \underline{0,187}$$

$$\underline{\text{obe smeri}} \rightarrow 2a = 10 \log \left(\frac{N_0}{N_s} \cdot |\Gamma|^2 \right)$$

$$a = 5 \log \left(\frac{N_0}{N_s} \cdot |\Gamma|^2 \right) = \underline{\underline{30,3 \text{ dB}}}$$

(V/24/9/03/4)

Sprejemniški APD-FET modul vsebuje plazovno fotodiodo s kvantnim izkoristkom $\eta=0,7$ in faktorjem množenja $M=20$ ter transimpedančni ojačevalnik z $R_t=10 \text{ k}\Omega$. Izračunajte izhodno napetost U , ki jo dajejo enice s po $N=1000$ fotonih pri bitni hitrosti $C=155 \text{ Mbit/s!}$ ($\lambda=1,3 \mu\text{m}$, $h=6,624 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$, $c=3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$, $Q_e=-1,6 \cdot 10^{-19} \text{ As}$)

$$Q = |Q_e| N \eta M$$

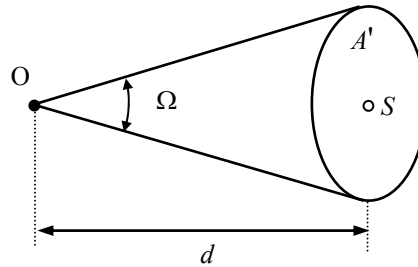
$$I = \frac{Q}{T} = QC$$

$$U = IR_t$$

$$U = |Q_e| N \eta M C R_t = \underline{\underline{3,47 \text{ mV}}}$$

(V/18/6/03/4)

Daljinec za televizor vsebuje svetlečo diodo, ki na valovni dolžini $\lambda=900$ nm sveti z močjo $P=5$ mW v prostorskem kotu $\Omega=1$ srđ. Izračunajte število fotonov N , ki v času trajanja enega bita $T=1$ ms padejo na sprejemno fotodiodo s površino $A=1$ mm² na oddaljenosti $d=10$ m! ($h=6,624\cdot 10^{-34}$ Js, $Q_e=-1,6\cdot 10^{-19}$ As)



$$A' = \Omega d^2$$

$$P_s = P \cdot \frac{A}{A'} = \frac{PA}{\Omega d^2}$$

$$W_f = hf = \frac{hc_0}{\lambda}$$

$$N = \frac{P_s}{W_f} \cdot T = \frac{PA}{\Omega d^2} \cdot \frac{\lambda}{hc_0} \cdot T = \underline{\underline{226450 \text{ fotonov}}}$$

(V/2/2/04/4)

Daljinec za televizor odda sporočilo z zmogljivostjo $C=1$ kbit/s na valovni dolžini $\lambda=900$ nm. Svetleča dioda daljinca odda enico z močjo $P_0=20$ mW enakomerno na vse strani. Televizor na oddaljenosti $r=5$ m od daljinca je opremljen s silicijevo PIN fotodiodo s površino $A=1$ mm², kvantnim izkoristkom $\eta=80$ % in kapacitivnostjo $C_d=80$ pF. Izračunajte napetost signala U_s na fotodiodi, ki jo povzroči oddana enica v sporočilu! ($Q_e=-1,6\cdot 10^{-19}$ As, $h=6,624\cdot 10^{-34}$ Js, $c=3\cdot 10^8$ m/s)

$$P_s = P_0 \frac{A}{4\pi r^2} = 20 \cdot 10^{-3} \text{ W} \frac{10^{-6} \text{ m}^2}{4\pi \cdot 25 \text{ m}^2} = \underline{\underline{63,7 \text{ pW}}}$$

$$U_s = \frac{Q}{C_d} = \frac{\eta |Q_e| P_s}{C_d hf C} = \frac{\eta |Q_e| \lambda P_s}{C_d hc_0 C} = \frac{0,8 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ As} \cdot 900 \cdot 10^{-9} \text{ m} \cdot 63,7 \cdot 10^{-12} \text{ W}}{80 \cdot 10^{-12} \frac{\text{As}}{\text{V}} \cdot 6,624 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ m/s} \cdot 10^3 \text{ s}^{-1}} = \underline{\underline{461 \mu\text{V}}}$$

(U/30/6/98/4)

Optični PIN-FET sprejemniški modul vsebuje električni ojačevalnik s šumno temperaturo $T=100$ K. Skupna kapacitivnost fotodiode in vhoda ojačevalnika znaša $C=3$ pF. Določite število fotonov, potrebnih za prenos logične enice pri valovni dolžini $\lambda=1,3$ μm , če zahtevamo razmerje $P_{\text{enice}}/P_{\text{suma}}=30$ na izhodnih sponkah sprejemnika in znaša kvantni izkoristek fotodiode $\eta=0,7$. ($h=6,624 \cdot 10^{-34}$ Js, $Q_e=-1,6 \cdot 10^{-19}$ As, $k_B=1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K)

$$P_N = \Delta f \cdot k_B \cdot T$$

$$U_N = \sqrt{P_N \cdot R}$$

$$R \approx \frac{1}{2\pi \cdot \Delta f \cdot C}$$

$$U_N = \sqrt{\frac{k_B \cdot T}{2\pi \cdot C}} = \underline{8,56 \mu\text{V}}$$

$$U_s = \frac{Q}{C} = \frac{N \cdot \eta \cdot |Q_e|}{C}$$

$$N = \frac{U_s \cdot C}{\eta \cdot |Q_e|} = U_N \cdot \sqrt{\frac{P_s}{P_N}} \cdot \frac{C}{\eta \cdot |Q_e|} = \underline{\underline{1255}} \text{ [fotonov/enica]}$$

(U/23/9/98/4)

Izračunajte domet infrardečega daljinca za televizor v praznem prostoru, ki deluje na valovni dolžini $\lambda=900$ nm! Sprejemna PIN fotodioda ima površino $A=1$ mm², kvantni izkoristek $\eta=0,7$ in kapacitivnost $C_0=100$ pF ter je priključena na predojačevalnik s šumno temperaturo $T=300$ K. Oddajna ledika ima izhodno svetlobno moč $P_0=1$ mW (enica) in je opremljena z lečo z dobitkom $G_0=10$. Bitna hitrost znaša $C=1$ kbit/s. Moč enice naj bo vsaj 30-krat večja od moči šuma. ($h=6,624\cdot 10^{-34}$ Js, $Q_e=-1,6\cdot 10^{-19}$ As, $k_B=1,38\cdot 10^{-23}$ J/K)

$$\Delta f = \frac{C}{2} = 500 \text{ Hz}$$

Moč enice je 30-krat večja od moči šuma.

$$P_{SE} = 30P_{NE} = 30 \cdot \Delta f k_B T = 30 \cdot \frac{C}{2} \cdot k_B T = \underline{6,21 \cdot 10^{-17} \text{ W}}$$

$$P_{SE} = \frac{U^2}{R} = \frac{\left(\frac{Q}{C_0}\right)^2}{\frac{1}{2\pi\Delta f C_0}} = 2\pi\Delta f \cdot \frac{1}{C_0} (Q_e N_e)^2 \rightarrow N_e = \frac{1}{|Q_e|} \cdot \sqrt{\frac{P_{SE} C_0}{2\pi\Delta f}} = \underline{8787}$$

$$N_f = \frac{N_e}{\eta} = \underline{12553}$$

$$P_{SO} = \frac{P_0 G_0}{4\pi r^2} \cdot A = \frac{CN_f hc_0}{\lambda} \rightarrow r = \sqrt{\frac{P_0 G_0 A \lambda}{4\pi CN_f hc_0}} = \underline{16,97 \text{ m}}$$

(U/9/6/99/4)

Sprejemniški PIN-FET modul vsebuje električni ojačevalnik s šumno temperaturo $T=100$ K in vhodno kapacitivnostjo $C_0=2$ pF vključno s fotodiodo. Izračunajte potrebno povprečno vhodno moč svetlobnega signala (50 % enic) pri bitni hitrosti $C=140$ Mbit/s, če zahtevamo razmerje $P_{\text{enice}}/P_{\text{šuma}}=30$ na električnem izhodu modula! ($h=6,624 \cdot 10^{-34}$ Js, $Q_e=-1,6 \cdot 10^{-19}$ As, $k_B=1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K, $\lambda_0=1,3$ μm , $\eta=70$ %)

$$U_N = \sqrt{\frac{k_B T}{2\pi C_0}} = \sqrt{\frac{1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K} \cdot 100 \text{ K}}{2\pi \cdot 2 \cdot 10^{-12} \text{ As/V}}} = \underline{10,48 \mu\text{V}}$$

$$U_S = U_N \cdot \sqrt{\frac{P_S}{P_N}} = \underline{57,4 \mu\text{V}}$$

$$N_f = \frac{U_S C_0}{|Q_e| \cdot \eta} = \underline{1025}$$

$$P_0 = \frac{1}{2} N_f W_f C = \frac{1}{2} \cdot \frac{N_f h c_0 C}{\lambda_0} = \underline{10,97 \text{ nW} = -49,6 \text{ dBm}}$$

(U/14/9/99/4)

Optični sprejemnik s PIN fotodiodo (kvantni izkoristek $\eta=0,8$ in kapacitivnost $C_d=3$ pF) in transimpedančnim ojačevalnikom ($C_0=2$ pF in $T=200$ K) ima občutljivost $P_{\text{min}}=-45$ dBm. Izračunajte občutljivost sprejemnika P'_{min} (v dBm), če vgradimo manjšo fotodiodo, ki ima kapacitivnost $C'_d=1,5$ pF in kvantni izkoristek $\eta'=0,7$! ($h=6,624 \cdot 10^{-34}$ Js, $Q_e=-1,6 \cdot 10^{-19}$ As, $k_B=1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K, $\lambda=1300$ nm)

$$P'_{\text{min}} = P_{\text{min}} + 10 \log \frac{\eta}{\eta'} + 10 \log \sqrt{\frac{C'_d + C_0}{C_d + C_0}} = -45 \text{ dBm} + 0,58 \text{ dB} - 0,77 \text{ dB} = \underline{-45,19 \text{ dBm}}$$

(U/24/3/00/4)

Optični PIN-FET sprejemniški modul vsebuje električni ojačevalnik s šumno temperaturo $T=150$ K. Skupna kapacitivnost fotodiode in vhoda ojačevalnika znaša $C=3$ pF. Določite razmerje $P_{\text{enice}}/P_{\text{šuma}}$ v dB na električnem izhodu sprejemnika! Kvantni izkoristek fotodiode znaša $\eta=0,7$, logično enico pa predstavlja $N=2000$ fotonov valovne dolžine $\lambda=1,3$ μm . ($h=6,624 \cdot 10^{-34}$ Js, $Q_e=-1,6 \cdot 10^{-19}$ As, $k_B=1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K)

$$U_{\text{enice}} = \frac{N\eta \cdot |Q_e|}{C} = \frac{2000 \cdot 0,7 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ As}}{3 \cdot 10^{-12} \text{ As/V}} = \underline{74,7 \mu\text{V}}$$

$$U_{\text{šuma}} = \sqrt{\frac{k_B T}{2\pi C}} = \sqrt{\frac{1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K} \cdot 150 \text{ K}}{2\pi \cdot 3 \cdot 10^{-12} \text{ As/V}}} = \underline{10,48 \mu\text{V}}$$

$$\frac{P_{\text{enice}}}{P_{\text{šuma}}} = \frac{U_{\text{enice}}^2}{U_{\text{šuma}}^2}$$

$$\left(\frac{P_{\text{enice}}}{P_{\text{šuma}}} \right)_{\text{dB}} = 20 \log \frac{U_{\text{enice}}}{U_{\text{šuma}}} = \underline{\underline{17 \text{ dB}}}$$

(U/5/7/00/4)

Sprejemniški PIN-FET modul za $C=622$ Mbit/s vsebuje fotodiodo s kvantnim izkoristkom $\eta=80$ % in transimpedančni ojačevalnik s transimpedanco $Z=1$ k Ω . Določite napetost signala na izhodu ($U_{\text{vrh-vrh}}$), če pripeljemo na vhod dvojiški signal s povprečno optično močjo $P_0=-30$ dBm in enakim številom enic ter ničel! ($\lambda=1300$ nm, $h=6,624 \cdot 10^{-34}$ Js, $c=3 \cdot 10^8$ m/s, $Q_e=-1,6 \cdot 10^{-19}$ As)

$$P_0 = -30 \text{ dBm} = \underline{1 \mu\text{W}}$$

$$U = ZI = Z \cdot \frac{|Q_e| \cdot \eta}{W} \cdot P_0 = Z \cdot \frac{|Q_e| \cdot \eta \lambda}{hc} \cdot 2P_0 = 10^3 \Omega \cdot \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ As} \cdot 0,8 \cdot 1,3 \cdot 10^{-6} \text{ m}}{6,624 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}} \cdot 2 \cdot 10^{-6} \text{ W}$$

$$\underline{\underline{U_{\text{vrh-vrh}} = 1,67 \text{ mV}}}$$

(U/20/9/00/4)

Infrardeči daljinec za televizor doseže domet $d=10$ m s sprejemno PIN fotodiodo s površino $A=1$ mm² in kapacitivnostjo $C=70$ pF, vhodna kapacitivnost nizkošumnega ($T=200$ K) električnega predojačevalnika pa znaša $C_a=20$ pF. Izračunajte povečani domet daljinca d' , če uporabimo večjo fotodiodo s površino $A'=4$ mm², ki ima površini sorazmerno višjo kapacitivnost, ter isti električni ojačevalnik! ($k_B=1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K)

$$C_1 = C + C_a = \underline{90 \text{ pF}}$$

$$C_2 = \frac{A'}{A} \cdot C + C_a = \underline{300 \text{ pF}}$$

$$I = \alpha A S_1$$

$$I' = \alpha A' S_2$$

$$\frac{U'_S}{U'_N} = \frac{\frac{I'}{I} \cdot \frac{C_1}{C_2} \cdot U_S}{\sqrt{\frac{C_1}{C_2}} \cdot U_N} = \frac{U_S}{U_N} \rightarrow I' = I \cdot \sqrt{\frac{C_2}{C_1}} \rightarrow S_2 = \frac{A}{A'} \cdot \sqrt{\frac{C_2}{C_1}} \cdot S_1$$

$$d' = d \cdot \sqrt{\frac{S_1}{S_2}} = d \cdot \sqrt{\frac{A'}{A} \cdot \frac{C_1}{C_2}} = \underline{\underline{14,8 \text{ m}}}$$

(U/15/2/01/4)

Izračunajte občutljivost optičnega sprejemnika (povprečna moč signala P_s) s fotopomnoževalko, ki ima pri valovni dolžini $\lambda=632,8$ nm kvantni izkoristek fotokatode $\eta=0,2$! Pri računu upoštevajte, da mehanizem ojačenja signala v fotopomnoževalki navidezno podvoji moč zrnatega šuma na vhodu fotopomnoževalke. Občutljivost sprejemnika izračunajte za bitni pretok $C=1$ kbit/s, 50 % verjetnost enice in $BER=1,0 \cdot 10^{-6}$. ($h=6,624 \cdot 10^{-34}$ Js, $c=3 \cdot 10^8$ m/s, $Q_e=-1,6 \cdot 10^{-19}$ As)

Verjetnost napake: $1 \rightarrow 0 : P = 10^{-6} = e^{-N} \rightarrow N_e = -\ln 10^{-6} = \underline{13,82}$

Zaradi podvojitve moči šuma v pomnoževalki, je v izrazu 2.

$$N_f = \frac{2}{\eta} \cdot N_e = \underline{138,2}$$

$$P_s = \frac{1}{2} CW = \frac{1}{2} CN_f hf = \frac{CN_f hc_0}{2\lambda} = \frac{10^3 /s \cdot 138,2 \cdot 6,624 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{2 \cdot 632,8 \cdot 10^{-9} \text{ m}} = \underline{\underline{2,2 \cdot 10^{-14} \text{ W}}}$$

(U/28/08/08/4)

Vlakenska zveza z zmogljivostjo $C=10$ Gbit/s ima oddajnik povprečne moči $P_0=10$ mW. Slabljenje zveze znaša $a=26$ dB pri valovni dolžini $\lambda=1532$ nm. Izračunajte povprečno število fotonov $N_f=?$, ki v času trajanja enega bita priletijo v sprejemnik! Kolikšno je povprečno število elektronov $N_e=?$ v tokokrogu plazovne fotodiode s kvantnim izkoristkom $\eta=0,7$ in faktorjem množenja $M=20$? ($c=3 \cdot 10^8$ m/s, $h=6,624 \cdot 10^{-34}$ Js, $Q_e=-1,6 \cdot 10^{-19}$ As)

$$N_{fo} = \frac{W}{hf} = \frac{P_0 T}{h \frac{c_0}{\lambda}} = \frac{P_0 \lambda}{Chc_0} = 7709339$$

$$a = 26 \text{ dB} = 400 \quad N_f = \frac{N_{fo}}{a} = \underline{19273}$$

$$N_e = N_f \cdot \eta \cdot M = \underline{\underline{269822}}$$

(U/20/6/01/4)

Hitra fotodioda s kvantnim izkoristkom $\eta=0,4$ na valovni dolžini $\lambda=1,55 \mu\text{m}$ je opremljena z elektrodami v obliki prenosnega vhoda s karakteristično impedanco $Z_k=50 \Omega$, ki je na enem koncu zaključena na prilagojeno breme $R=50 \Omega$, na drugem pa na ojačevalnik z vhodno impedanco $Z=50 \Omega$, šumno temperaturo $T=500 \text{ K}$ in pasovno širino $B=10 \text{ GHz}$. Izračunajte povprečno moč P $C=10 \text{ Gbps}$ optičnega signala na vhodu sprejemnika, ki da razmerje $U_{S1}/U_{\text{neff}}=20$ na električnem izhodu! ($h=6,624 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$, $Q_e=-1,6 \cdot 10^{-19} \text{ As}$, $k_B=1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$)

$$P_N = Bk_B T = 10^{10} \text{ s}^{-1} \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K} \cdot 500 \text{ K} = \underline{69 \text{ pW}}$$

$$U_N = \sqrt{P_N R} = \sqrt{69 \cdot 10^{-12} \text{ W} \cdot 50 \Omega} = \underline{58,7 \mu\text{V}}$$

$$U_{S1} = 20U_N = \underline{1,175 \text{ mV}}$$

$$I_{S1} = \frac{U_{S1}}{R \parallel Z} = \underline{47 \mu\text{A}}$$

$$P = \frac{I_{S1}}{2\eta} \cdot \frac{W_f}{|Q_e|} = \frac{I_{S1} hc}{2\eta \lambda |Q_e|} = \frac{47 \cdot 10^{-6} \text{ A} \cdot 6,624 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{2 \cdot 0,4 \cdot 1,55 \cdot 10^{-6} \text{ m} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ As}} = \underline{47 \mu\text{W}}$$

(U/18/7/01/4)

Optični sprejemnik je izdelan kot APD-FET modul s fotodiodo s kvantnim izkoristkom $\eta=0,7$ in faktorjem multiplikacije $M=10$. Električno vezje je izvedeno kot transimpedančni ojačevalnik z $R_t=10 \text{ k}\Omega$. Izračunajte vhodno moč optičnega signala P_0 z valovno dolžino $\lambda_0=1,55 \mu\text{m}$, ki na izhodu sprejemnika da napetost signala $U_S=100 \text{ mV}$! ($h=6,624 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$, $c=3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$, $Q_e=-1,6 \cdot 10^{-19} \text{ As}$)

$$I_S = \frac{U_S}{R_t} = \underline{10 \mu\text{A}}$$

$$P_0 = W_f \cdot \frac{dN_f}{dt} = W_f \cdot \frac{1}{\eta} \cdot \frac{1}{M} \cdot \frac{dN_e}{dt} = \frac{hc_0}{\lambda_0 \eta M} \cdot \frac{I}{|Q_e|} = \underline{1,145 \mu\text{W} = -29,4 \text{ dBm}}$$

(U/29/3/02/4)

Sprejemniški APD-FET modul vsebuje plazovno fotodiodo s faktorjem množenja $M=10$ in kvantnim izkoristkom $\eta=0,7$ ter električni ojačevalnik s šumno temperaturo $T=200$ K. Skupna vhodna kapacitivnost fotodiode in ojačevalnika znaša $C_V=2$ pF. Izračunajte število fotonov N z valovno dolžino $\lambda=1,3$ μm na vhodu APD-FET modula, ki dajo enako močen signal kot skupni električni šum in šum multiplikacije! Zaporna napetost na fotodiodi je izbrana tako, da sta oba šuma enako velika. ($C=140$ Mbit/s, $h=6,624 \cdot 10^{-34}$ Js, $Q_e=-1,6 \cdot 10^{-19}$ As, $k_B=1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K)

$$P_N = P_{NM} + P_{N\text{TOPLOTNI}} = 2P_{N\text{TOPLOTNI}}$$

$$U_N = \sqrt{2} \cdot U_{N\text{TOPLOTNI}} = \sqrt{\frac{k_B T}{\pi C_V}} = \underline{21 \mu\text{V}}$$

$$U_N = U_S = \frac{Q}{C_V} = \frac{N\eta M |Q_e|}{C_V} \rightarrow N = \frac{U_N C_V}{\eta M |Q_e|} = \underline{\underline{37,4}}$$

(U/26/6/02/4)

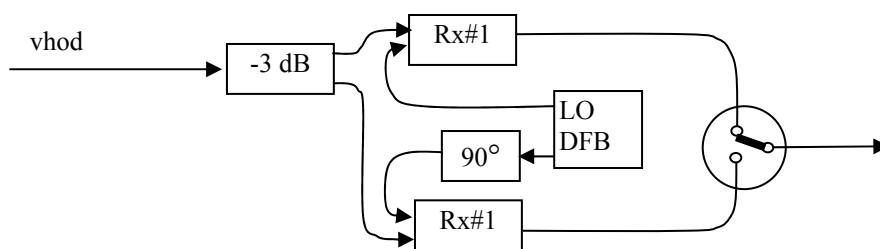
PIN-FET sprejemnik ima občutljivost $P_{\min}=-40$ dBm pri zmogljivosti zveze $C=155$ Mbit/s. Izračunajte občutljivost izboljšane sprejemnika P_{\min}' , kjer prvotno PIN fotodiodo s kapacitivnostjo $C_d=2$ pF in kvantnim izkoristkom $\eta=0,6$ nadomestimo z boljšo fotodiodo s kapacitivnostjo $C_d'=1$ pF in kvantnim izkoristkom $\eta'=0,8$! Električni ojačevalnik ostane v obeh primerih enak z isto kapacitivnostjo $C_O=1$ pF in šumno temperaturo $T=200$ K. ($h=6,624 \cdot 10^{-34}$ Js, $Q_e=-1,6 \cdot 10^{-19}$ As, $k_B=1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K)

$$\left. \begin{aligned} U_S &= \frac{Q}{C_d + C_O} = \frac{\eta N_f |Q_e|}{C_d + C_O} \\ U_{\text{Neff}} &= \sqrt{B k_B T R} \approx \sqrt{\frac{k_B T}{2\pi(C_d + C_O)}} \end{aligned} \right\} \begin{aligned} U_S &= \frac{\eta N_f |Q_e| \sqrt{2\pi}}{\sqrt{k_B T (C_d + C_O)}} = \alpha \cdot \frac{\eta N_f}{\sqrt{C_d + C_O}} = \alpha' \cdot \frac{\eta P}{\sqrt{C_d + C_O}} \\ U_{\text{Neff}} &= \frac{\eta N_f}{\sqrt{C_d + C_O}} \end{aligned}$$

$$P'_{\min} = P_{\min} \left(\frac{\eta}{\eta'} \right) \sqrt{\frac{C'_d + C_O}{C_d + C_O}} = 0,612 \cdot P_{\min} = \underline{\underline{61,2 \text{ nW} = -42,1 \text{ dBm}}}$$

(U/14/3/03/4)

Delovanje koherentnega optičnega sprejemnika moti neskladnost polarizacije med vhodnim signalom in signalom lokalnega oscilatorja (DFB laserja). Koliko znaša izguba občutljivosti sprejemnika (v dB) v najboljšem slučaju a_1 in najslabšem slučaju a_2 , če vhodni signal razdelimo med dva sprejemnika, ki imata ortogonalno polarizirana lokalna oscilatorja? Elektronika izbere izhod tistega sprejemnika, ki trenutno daje na svojem izhodu boljše razmerje signal/šum.



$$a = 3 \text{ dB} - 20 \log(\cos \alpha)$$

polarizacija:

$$\alpha = 0 \rightarrow \underline{\underline{a_1 = 3 \text{ dB}}}$$

poševna polarizacija:

$$\alpha = \frac{\pi}{4} \rightarrow \underline{\underline{a_2 = 6 \text{ dB}}}$$

(U/18/6/03/4)

Fotopomnoževalka ima $N=10$ množilnih elektrod (dinod), ki v povprečju proizvedejo $M=4$ sekundarne elektrone za vsak vpadni elektron. Izračunajte vpadno svetlobno moč P na fotokatodo, ki ima pri valovni dolžini $\lambda=632,8$ nm kvantni izkoristek $\eta=0,2$, če znaša končni anodni tok $I_a=1$ mA. ($h=6,624\cdot 10^{-34}$ Js, $c=3\cdot 10^8$ m/s, $Q_e=-1,6\cdot 10^{-19}$ As)

$$I_a = I_K M^N$$

$$I_K = |Q_e| \frac{dN_e}{dt}$$

$$P = hf \frac{dN_f}{dt} = h \cdot \frac{c_0}{\lambda} \cdot \frac{1}{\eta} \cdot \frac{dN_e}{dt} = \frac{hc_0}{\lambda \eta} \cdot \frac{I_a}{|Q_e| M^N} = \underline{\underline{9,36 \text{ nW}}}$$

(U/13/6/07/4)

Fotopomnoževalka ima fotokatodo s kvantnim izkoristkom $\eta=0,2$ pri valovni dolžini $\lambda=700$ nm in $N=10$ množilnih elektrod, od katerih vsaka pomnoži tok elektronov s faktorjem $M=5$. Koliko fotonov N_f mora vsebovati svetlobni paket z valovno dolžino $\lambda=700$ nm, da ga fotopomnoževalka zazna z verjetnostjo vsaj $P=90\%$? ($h=6,624\cdot 10^{-34}$ Js, $c=3\cdot 10^8$ m/s, $Q_e=-1,6\cdot 10^{-19}$ As)

$$\text{Verjetnost da zazna } m \text{ elektronov } P(m_e) = N_e^{m_e} \frac{e^{-N_e}}{m_e!}$$

$$\text{Verjetnost da zazna ničlo } P(0) = e^{-N_e} = 1 - P$$

$$N_e = -\ln(1 - P)$$

$$N_f = \frac{N_e}{\eta} = -\frac{\ln(1 - P)}{\eta} = \underline{\underline{11,5 = 12 \text{ fotonov}}}$$

$$G = M^N = 9,77 \cdot 10^6 \gg 1$$

(U/19/12/03/4)

Sprejemniški APD-FET modul za zvezo zmogljivosti $C=622$ Mbit/s na valovni dolžini $\lambda=1300$ nm vsebuje plazovno fotodiodo s kvantnim izkoristkom $\eta=75\%$ in optimalnim faktorjem multiplikacije $M=15$. Izračunajte napetost $U_{\text{vrh-vrh}}$ na izhodu transimpedančnega ojačevalnika z $R_t=800\ \Omega$ pri povprečni moči vhodnega svetlobnega signala $P_0=-35$ dBm z uravnoveženim razmerjem enic in ničel! ($h=6,624\cdot 10^{-34}$ Js, $c=3\cdot 10^8$ m/s, $Q_e=-1,6\cdot 10^{-19}$ As)

$$I_s = 2P_0 \cdot \frac{|Q_e|\lambda}{hc_0} \cdot \eta M$$

$$P_0 = -35 \text{ dBm} = 316 \text{ nW}$$

$$U_s = I_s R_t = 2P_0 \cdot \frac{|Q_e|\lambda}{hc_0} \cdot \eta M R_t = \underline{\underline{5,96 \text{ mV}}}$$

(V/9/4/99/5)

Povprečna svetlobna moč signala na vhodu sprejemnika znaša $P_s=-40$ dBm pri bitni hitrosti $C=140$ Mbit/s (dvojiški prenos) in valovni dolžini (v praznem prostoru) $\lambda_0=1,3$ μm . Izračunajte število fotonov, ki predstavljajo logično enico, če signal v povprečju vsebuje enako število enic in ničel. Ničlo predstavlja ugasnjen izvor svetlobe. ($h=6,624\cdot 10^{-34}$ Js)

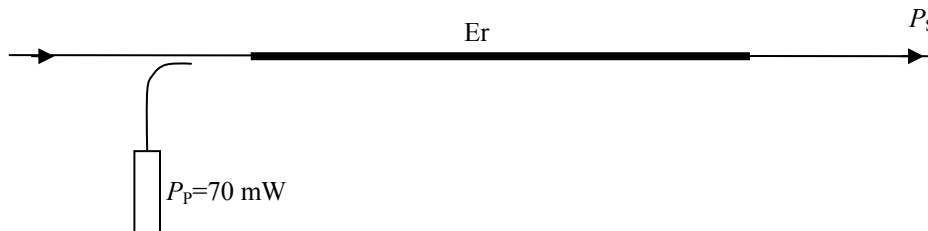
$$\underline{\underline{P_s = -40 \text{ dBm} = 100 \text{ nW} = 10^{-7} \text{ W}}}$$

$$N = 2 \cdot \frac{P_s}{CW} = \frac{2P_s}{Chf} = \frac{2P_s\lambda_0}{Chc_0} = \frac{2 \cdot 10^{-7} \text{ W} \cdot 1,3 \cdot 10^{-6} \text{ m}}{140 \cdot 10^6 / \text{s} \cdot 6,624 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}} = \underline{\underline{9346}}$$

18. EDFA

(V/1/2/00/5)

Optični ojačevalnik z erbijevim vlaknom črpamo z laserjem moči $P_p=70$ mW na valovni dolžini $\lambda_p=980$ nm. Določite izhodno moč ojačevalnika P_s na valovni dolžini signala $\lambda_s=1550$ nm, če ojačevalnik izkorišča $\eta=90$ % fotonov črpalke!



$$\Delta W_p = hf_p = \frac{hc_0}{\lambda_p}$$

$$\Delta W_s = hf_s = \frac{hc_0}{\lambda_s}$$

$$P_s = \eta P_p \cdot \frac{\Delta W_s}{\Delta W_p} = \eta P_p \cdot \frac{\lambda_p}{\lambda_s} = 0,9 \cdot 70 \text{ mW} \cdot \frac{980 \text{ nm}}{1550 \text{ nm}} = \underline{\underline{39,8 \text{ mW}}}$$

(V/15/2/01/5)

Izračunajte potrebno moč črpalke P_c laserskega ojačevalnika z erbijevim vlaknom, ki dela na valovni dolžini $\lambda_c=980$ nm! Od ojačevalnika zahtevamo, da razmeroma šibek vhodni signal z valovno dolžino $\lambda_s=1550$ nm ojača na izhodno moč $P_i=25$ mW. Ojačevalnik izkoristi $\eta=90$ % fotonov črpalke, dodatne izgube sklopa črpalke in izhodnega izolatorja pa znašajo $a=1$ dB.

$$a = 1 \text{ dB} = 1,259$$

$$P_c = P_i \frac{\lambda_s}{\lambda_c} \cdot \frac{1}{\eta} \cdot a = 25 \text{ mW} \cdot \frac{1550 \text{ nm}}{980 \text{ nm}} \cdot \frac{1}{0,9} \cdot a = \underline{\underline{55,3 \text{ mW}}}$$

(V/11/10/02/5)

Erbijev vlakenski optični ojačevalnik črpamo s svetlobo valovne dolžine $\lambda_c=980$ nm do popolne inverzne naseljenosti energijskih nivojev. Brez vhodnega signala daje ojačevalnik svetlobno moč spontanega sevanja $P=15$ mW v pasu okoli $\lambda=1550$ nm. Izračunajte število erbijevih ionov N v ojačevalnem vlaknu, če spontano sevanje preneha $t=10$ ms po izklopu črpalke! ($h=6,624 \cdot 10^{-34}$ Js, $c=3 \cdot 10^8$ m/s)

$$W = Pt = Nhf = N \cdot \frac{hc_0}{\lambda} \rightarrow N = \frac{Pt\lambda}{hc_0} = \frac{15 \cdot 10^{-3} \text{ W} \cdot 10^{-2} \text{ s} \cdot 1550 \cdot 10^{-9} \text{ m}}{6,624 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}} = \underline{\underline{1,17 \cdot 10^{15}}}$$

(V/24/9/03/5)

Laserski ojačevalnik z erbijevim vlaknom doseže izhodno moč $P=+17$ dBm pri valovni dolžini $\lambda=1550$ nm. Izračunajte potrebno moč P' črpalnega laserja na valovni dolžini $\lambda'=980$ nm, če ojačevalno vlakno izkorišča $\eta=85$ % fotonov črpalke in znašajo dodatne izgube v izolatorju na izhodu ojačevalnika $a=0,3$ dB!

$$\underline{P = +17 \text{ dBm} = 50,1 \text{ mW}}$$

$$\underline{a = 0,3 \text{ dB} = 1,072}$$

$$P' = Pa \cdot \frac{\lambda}{\lambda'} \left(\frac{1}{\eta} \right) = \underline{\underline{99,9 \text{ mW} = +20 \text{ dBm}}}$$

(U/30/6/98/5)

Erbijev optični ojačevalnik s črpanjem na 980 nm in šumnim faktorjem $F=4$ dB (v logaritemskih enotah!) ojačuje pas valovnih dolžin širine $\Delta\lambda=25$ nm okoli osrednje valovne dolžine $\lambda_0=1550$ nm. Jakost vhodnega signala znaša $P_{vh}=-20$ dBm in jakost izhodnega signala $P_{iz}=+10$ dBm. Določite jakost šuma (spontane emisije) na izhodu ojačevalnika! ($h=6,624\cdot 10^{-34}$ Js)

$$G = P_{iz} - P_{vh} = 30 \text{ dB}$$

$$\text{notranje ojačenje: } G' = G + (F - 3 \text{ dB}) = 31 \text{ dB} = \underline{1259}$$

črpalka 980 nm $\rightarrow \mu \approx 1$

$$\nu = \frac{c_0}{\lambda_0} = \underline{193,5 \text{ THz}}$$

$$\Delta\nu = \nu \cdot \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \underline{3,12 \text{ THz}}$$

$$P_n = \mu(G'-1)h\nu \cdot \Delta\nu = \underline{\underline{0,5 \text{ mW} = -3 \text{ dBm}}}$$

19. Optične zveze

(V/24/3/00/5)

Izračunajte zmogljivost C optične zveze dolžine $l=100$ km po enorodovnem vlaknu s koeficientom disperzije $D=18$ ps/(nm·km)! V oddajniku uporabimo laser na valovni dolžini $\lambda=1550$ nm in širino spektra $\Delta\lambda=3$ nm. Zmogljivost zveze nam omejuje razširitev impulzov v sprejemniku, ki naj ne presega ene tretjine bitne periode.

$$\Delta t = l \cdot \Delta\lambda \cdot D = 100 \text{ km} \cdot 3 \text{ nm} \cdot 18 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km}) = \underline{5,4 \text{ ns}}$$

$$C = \frac{1}{3\Delta t} = \frac{1}{3 \cdot 5,4 \cdot 10^{-9} \text{ s}} = \underline{\underline{61,7 \text{ Mbit/s}}}$$

(U/15/2/07/5)

Izračunajte domet optične zveze d , ki ga omejuje razširitev impulzov zaradi barvne disperzije enorodovnega vlakna! Koeficient barvne disperzije znaša $D=5$ ps/(nm·km). Oddajnik vsebuje neposredno moduliran FP laser s svetlobno pasovno širino $\Delta f=400$ GHz pri osrednji frekvenci $f=194$ THz. Razpršitev impulzov ne sme preseči ene tretine trajanja bita pri prenosni zmogljivosti $C=622$ Mbit/s. ($c=3 \cdot 10^8$ m/s)

$$\Delta t = \frac{1}{3C} = \underline{536 \text{ ps}}$$

$$\Delta\lambda = \Delta f \frac{c_0}{f^2} = \underline{3,19 \text{ nm}}$$

$$d = \frac{\Delta t}{D \cdot \Delta\lambda} = \underline{\underline{33,6 \text{ km}}}$$

(V/5/7/00/5)

Izračunajte domet d optične zveze po enorodovnem vlaknu, ki ima nekompenzirano disperzijo $D=17$ ps/(nm·km)! Kot oddajnik uporabimo neposredno modulirani FP laser s širino spektra $\Delta\lambda=2$ nm na osrednji valovni dolžini $\lambda=1550$ nm. Bitna hitrost znaša $C=622$ Mbit/s. Domet zveze omejuje razširitev impulzov zaradi disperzije, ki naj ne presega ene tretjine bitne periode.

$$\Delta t = D\Delta\lambda d = \frac{1}{3C} \rightarrow d = \frac{1}{3CD\Delta\lambda} = \frac{1}{3 \cdot 622 \cdot 10^6 \text{ /s} \cdot 17 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km}) \cdot 2 \text{ nm}} = \underline{\underline{15,8 \text{ km}}}$$

(V/29/9/04/5)

Izračunajte domet d optične zveze po svetlobnem vlaknu z nekompenziranim disperzijskim koeficientom $D=17$ ps/(nm·km) pri valovni dolžini $\lambda=1550$ nm. Oddajnik vsebuje svetlobni izvor s spektralno širino $B=500$ GHz, svetlobni impulzi pa naj se ne razširijo za več kot $t_{\max}=1$ ns. ($c=3\cdot 10^8$ m/s)

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{c_0} B = 4,0042 \text{ nm}$$

$$\Delta t = t_{\max}$$

$$l = \frac{\Delta t}{\Delta\lambda D} = \underline{\underline{14,69 \text{ km}}}$$

(V/20/9/00/5)

Optična zveza ima zmogljivost $C_1=155$ Mbit/s in domet $d_1=100$ km, ki ga določa toplotni šum električnega ojačevalnika za fotodiodo v sprejemniku. Izračunajte domet zveze d_2 z istim oddajnikom in sprejemnikom, če zmogljivost povečamo na $C_2=622$ Mbit/s! Toplotni šum sprejemnika je premosorazmeren pasovni širini, ostale omejitve dometa zanemarimo, slabljenje vlakna znaša v povprečju $a=0,35$ dB/km.

$$\Delta a_e = 10 \log \frac{P_{N2}}{P_{N1}} = 10 \log \frac{C_2}{C_1} = \underline{\underline{6,035 \text{ dB}}}$$

$$\Delta a_0 = \frac{1}{2} \Delta a_e = \underline{\underline{3,017 \text{ dB}}} \quad \text{ker ne spreminjamo bremenskega upora fotodiode}$$

$$\Delta l = \frac{\Delta a_0}{a} = \underline{\underline{8,621 \text{ km}}}$$

$$d_2 = d_1 - \Delta l = \underline{\underline{91,4 \text{ km}}}$$

(V/19/9/01/5)

Disperzijo v enorodovnem vlaknu koristno uporabimo za zmanjševanje presluha zaradi nelinearnih pojavov pri ojačevani WDM prekooceanski zvezi na razdalji $l=7000$ km. Izračunajte časovno razliko Δt v času potovanja signalov na sosednjih svetlobnih nosilcih, ki so razmaknjeni za $\Delta f=100$ GHz pri osrednji frekvenci $f_0=194$ THz! Vlakno ima v tem frekvenčnem pasu povprečni disperzijski koeficient $D=17$ ps/(nm·km).

$$\Delta\lambda = \lambda \cdot \frac{\Delta f}{f_0} = c_0 \cdot \frac{\Delta f}{f_0^2} = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s} \cdot \frac{100 \cdot 10^9 \text{ Hz}}{(194 \cdot 10^{12} \text{ Hz})^2} = \underline{0,8 \text{ nm}}$$

$$\Delta t = D \cdot \Delta\lambda \cdot l = 17 \text{ ps/(nm} \cdot \text{km)} \cdot 0,8 \text{ nm} \cdot 7000 \text{ km} = \underline{95 \text{ ns}}$$

(V/22/1/02/5)

Kolikšen sme biti disperzijski koeficient D (ps/nm·km) enorodovnega vlakna pri valovni dolžini $\lambda_0=1550$ nm, če zahtevamo, da se pri prenosni hitrosti $C=2,488$ Gbit/s impulzi ne razširijo za več kot tretjino dolžine enega bita? Širina spektra svetlobnega izvora vključno z modulacijo znaša $\Delta f=50$ GHz, dolžina zveze pa je $l=50$ km.

$$\Delta t = \frac{1}{3C} = \underline{134 \text{ ps}}$$

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda_0^2 \Delta f}{c_0} = \underline{0,4 \text{ nm}}$$

$$D = \frac{\Delta t}{\Delta\lambda \cdot l} = \frac{134 \text{ ps}}{0,4 \text{ nm} \cdot 50 \text{ km}} = \underline{6,69 \frac{\text{ps}}{\text{nm} \cdot \text{km}}}$$

(V/14/3/03/5)

Kolikšen sme biti disperzijski koeficient D (ps/(nm·km)) enorodovnega vlakna pri valovni dolžini $\lambda=1,3 \mu\text{m}$, če zahtevamo, da se pri prenosni hitrosti $C=622 \text{ Mbps}$ impulzi ne razširijo za več kot tretjino trajanja bita? Dolžina zveze je $l=85 \text{ km}$, kot izvor svetlobe pa uporabimo mnogorodovni FP laser z dolžino rezonatorja $l_r=500 \mu\text{m}$, ki niha na $N=10$ rodovih. Lomni količnik polprevodniškega čipa znaša $n=3,7$. ($c=3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$)

$$\Delta f = N \cdot \frac{c_0}{2l_r n} = \underline{811 \text{ GHz}}$$

$$\Delta \lambda = \Delta f \cdot \frac{\lambda^2}{c_0} = \underline{4,57 \text{ nm}}$$

$$\Delta t = \frac{1}{3C} = \underline{536 \text{ ps}}$$

$$D = \frac{\Delta t}{l \Delta \lambda} = \underline{1,38 \frac{\text{ps}}{\text{nm} \cdot \text{km}}}$$

(V/26/6/02/5)

Kolikšen je domet zveze po vlaknu s koeficientom disperzije $D=17 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ z zmogljivostjo $C=622 \text{ Mbit/s}$? Oddajnik uporablja mnogorodovni PF laser s pasovno širino $\Delta f=300 \text{ GHz}$ pri osrednji frekvenci $f=194 \text{ THz}$. Omejitev dometa predstavlja razširitev impulzov, ki ne sme preseči ene tretjine trajanja enega bita. ($c=3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$)

$$\left| \frac{\Delta \lambda}{\lambda} \right| = \left| \frac{\Delta f}{f} \right| \rightarrow \Delta \lambda = \frac{\Delta f c_0}{f^2} = \underline{2,391 \text{ nm}}$$

$$\Delta t = \frac{1}{3C} = D \Delta \lambda l \rightarrow l = \frac{1}{3CD \Delta \lambda} = \frac{1}{3 \cdot 622 \cdot 10^6 \text{ s}^{-1} \cdot 17 \cdot 10^{-12} \text{ s}/(\text{nm} \cdot \text{km}) \cdot 2,391 \text{ nm}} = \underline{13,18 \text{ km}}$$

(V/22/1/03/5)

Podmorski prekooceanski kabel sestavlja $N=100$ odsekov dolžine $l=50$ km. Odseki vsebujejo enorodovno optično vlakno s slabljenjem $a=0,22$ dB/km pri valovni dolžini $\lambda=1,55$ μm . Vsakemu odseku vlakna sledi erbijev laserski ojačevalnik ($F=3$ dB), ki nadomesti izgube v vlaknu. Izračunajte skupno šumno moč ojačenega spontanega sevanja P_{ase} na koncu verige na obeh polarizacijah skupaj, če znaša pasovna širina sistema $\Delta\lambda=30$ nm! ($h=6,624\cdot 10^{-34}$ Js, $c_0=3\cdot 10^8$ m/s)

$$G = a \cdot l = 11 \text{ dB} = \underline{12,6}$$

$$f = \frac{c_0}{\lambda} = \underline{193,5 \text{ THz}}$$

$$\Delta f = \Delta\lambda \frac{f}{\lambda} = \underline{3,75 \text{ THz}}$$

$$F = 3 \text{ dB} \rightarrow \underline{\mu = 1}$$

$$P_{\text{ase}} = 2 N \mu (G - 1) h f \Delta f = \underline{1,11 \text{ mW}}$$

(V/18/6/03/5)

Prekooceanski kabel uporablja valvnodolžinski multipleks (WDM) in erbijeve svetlobne ojačevalnike. V prvem pasu valovnih dolžin $\lambda_1=1530$ nm – 1540 nm uporabljamo $C_1=2,5$ Gbit/s kanale s kanalskim razmakom $\Delta f_1=50$ GHz, v drugem pasu $\lambda_2=1545$ nm – 1565 nm pa $C_2=10$ Gbit/s kanale s kanalskim razmakom $\Delta f_2=100$ GHz. Kolikšna je celotna zmogljivost C kabla z $N=8$ svetlobnimi vlakni? ($c=3\cdot 10^8$ m/s)

$$N_1 = \frac{\Delta\lambda_1 \cdot \frac{c_0}{\lambda_1^2}}{\Delta f_1} = \frac{1273 \text{ GHz}}{50 \text{ GHz}} = 25,46 \Rightarrow \underline{25 \text{ kanalov}}$$

$$N_2 = \frac{\Delta\lambda_2 \cdot \frac{c_0}{\lambda_2^2}}{\Delta f_2} = \frac{2481 \text{ GHz}}{100 \text{ GHz}} = 24,81 \Rightarrow \underline{24 \text{ kanalov}}$$

$$C = N(C_1 N_1 + C_2 N_2) = 8(62,5 \text{ Gbit/s} + 240 \text{ Gbit/s}) = \underline{2,42 \text{ Tbit/s}}$$

(U/23/9/98/5)

Izračunajte domet ojačevane optične zveze, ki uporablja običajno optično vlakno 9/125 μm s stopničastim lomnim likom pri valovni dolžini $\lambda=1550$ nm. Spektralna širina svetlobnega izvora znaša $\Delta\lambda=1$ nm, bitna hitrost $C=2,5$ Gbit/s in disperzijski koeficient vlakna $D=18$ ps/(nm·km). Disperzije v vlaknu ne kompenziramo, zato zahtevamo, da se začetni impulz ne razširi na več kot eno tretjino trajanja enega bita podatkov.

$$\Delta t = D \cdot l \cdot \Delta\lambda = \frac{T}{3} = \frac{1}{3C} \rightarrow l = \frac{1}{3CD \cdot \Delta\lambda} = \underline{\underline{7,4 \text{ km}}}$$

(U/18/12/98/5)

Izračunajte domet ojačevane optične zveze na valovni dolžini $\lambda=1550$ nm z uporabo običajnega vlakna z disperzijskim koeficientom $D=18$ ps/(nm·km)! Oddajnik uporablja DFB laser z zelo ozko spektralno črto (manj kot 10 MHz) in zunanjim amplitudnim modulatorjem. Pasovno širino signala zato določa modulacija $C=10$ Gbit/s. Na sprejemni strani zahtevamo, da razlika zakasnitev najvišje in najnižje spektralne komponente signala ne preseže polovico bitne periode.

$$\text{AM: } B = C = \underline{\underline{10 \text{ GHz}}}$$

$$T = \frac{1}{C} = \underline{\underline{100 \text{ ps}}}$$

$$\Delta t = D \cdot l \cdot \Delta\lambda$$

$$\Delta\lambda = \lambda \cdot \frac{B}{f} = \frac{\lambda^2 B}{c_0} = \frac{(1550 \text{ nm})^2 \cdot 10 \cdot 10^9 \text{ Hz}}{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}} = \underline{\underline{0,08 \text{ nm}}}$$

$$L = \frac{\Delta t}{D \cdot \Delta\lambda} = \frac{\frac{T}{2}}{D \cdot \Delta\lambda} = \frac{50 \text{ ps}}{18 \text{ ps}/(\text{km} \cdot \text{nm}) \cdot 0,08 \text{ nm}} = \underline{\underline{34,7 \text{ km}}}$$

(U/9/6/99/5)

Kolikšen sme biti disperzijski koeficient D (ps/(nm·km)) enorodovnega vlakna pri valovni dolžini $\lambda_0=1300$ nm, če zahtevamo, da se pri prenosni hitrosti $C=2,5$ Gbit/s impulzi ne razširijo za več kot tretjino dolžine enega bita. Širina spektra svetlobnega izvora znaša $\Delta f=300$ GHz, dolžina zveze pa je $l=70$ km.

$$D = \frac{\Delta t}{\Delta \lambda \cdot l} = \frac{\frac{1}{3C}}{\frac{\Delta f \cdot \lambda_0^2}{c_0} \cdot l} = \frac{c_0}{\Delta f \cdot \lambda_0^2 3C \cdot l} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{300 \cdot 10^9 \text{ s}^{-1} \cdot (1300 \cdot 10^{-9} \text{ m})^2 \cdot 70 \cdot 10^3 \text{ m} \cdot 3 \cdot 2,5 \cdot 10^9 \text{ s}^{-1}}$$

$$\underline{\underline{D = 1,127 \cdot 10^{-6} \text{ s/m}^2 = 1,127 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})}}$$

(U/14/9/99/5)

V optični zvezi uporabimo oddajnik povprečne moči $P_0=1$ mW na valovni dolžini $\lambda=1550$ nm in s širino spektra $\Delta\lambda=1$ nm. Enorodovno vlakno ima slabljenje $a=0,2$ dB/km in disperzijski koeficient $D=18$ ps/(nm·km). Sprejemnik ima občutljivost $P_S=-35$ dBm pri zmogljivosti $C=1$ Gbit/s, toplotni šum električnega ojačevalnika v sprejemniku pa je premosorazmeren pasovni širini. Določite tisto zmogljivost zveze C' , pri kateri je omejitev dometa zaradi slabljenja primerljiva omejitvi dometa zaradi disperzije, če naj se impulzi ne razširijo za več kot tretjino bitne periode!

$$d_s = \frac{10 \log \left(\frac{P_0}{P_S} \cdot \frac{C}{C'} \right)}{a} = \frac{35 - 10 \log(C')}{0,2} \text{ km}$$

$$d_d = \frac{1}{D \cdot \Delta\lambda \cdot 3C'} = \frac{1}{18 \text{ ps} \cdot 3C'} \text{ km} = \frac{1}{0,054C'} \text{ km}$$

(za C' enote Gbit/s)

$$d_s = d_d \rightarrow 175 - 50 \log C' = 18,519 \cdot \frac{1}{C'}$$

$$\text{številski rešitev: } 175 - 50 \log x = \frac{18,519}{x} \rightarrow x_{n+1} = \frac{18,519}{175 - 50 \log x_n}$$

$$x_0 = 1$$

$$x_1 = 0,106$$

$$x_2 = 0,083$$

$$x_3 = 0,081$$

$$x_4 = 0,081 \rightarrow \underline{\underline{C' = 81 \text{ Mbit/s}}}$$

$$\underline{\underline{d_s = d_d = 229 \text{ km}}}$$

(U/5/7/00/5)

Na vhod idealnega optičnega ojačevalnika z Er^{3+} vlaknom in črpalko na 980 nm (popolna inverzna naseljenost, $F=3$ dB) pripeljemo signal z valovno dolžino $\lambda=1550$ nm in močjo $P=-10$ dBm. Izračunajte razmerje signal/šum na izhodu ojačevalnika, kjer večino šuma predstavlja ojačeno spontano sevanje laserskega ojačevalnika v pasovni širini $B=4$ THz! ($h=6,624 \cdot 10^{-34}$ Js, $c=3 \cdot 10^8$ m/s)

$$P = -10 \text{ dBm} = 100 \mu\text{W}$$

$$P_s = G \cdot P$$

$$P_N \approx GhfB \quad (\text{ena polarizacija})$$

$$G \gg 1$$

$$\frac{P_s}{P_N} = \frac{P}{hfB} = \frac{P\lambda}{hcB} = \frac{0,1 \cdot 10^{-3} \text{ W} \cdot 1,55 \cdot 10^{-6} \text{ m}}{6,624 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ m/s} \cdot 4 \cdot 10^{12} /\text{s}} = 195 = \underline{\underline{22,9 \text{ dB}}}$$

(U/20/9/00/5)

Ojačevano optično zvezo sestavlja $N=10$ enakih odsekov s slabljenjem $a=-20$ dB na vsakem odseku, ki ga nadomestimo s prav toliko idealnimi ($F=3$ dB) erbijevimi ojačevalniki. Izračunajte šumno moč spontane emisije ojačevalnikov na koncu takšne zveze (obe polarizaciji), če znaša pasovna širina ojačevalnikov $B=4$ THz in osrednja frekvenca $f=196$ THz! ($h=6,624 \cdot 10^{-34}$ Js)

$$G = \frac{1}{a} = +20 \text{ dB} = 100$$

$$P_N = 2NGhfB = 2 \cdot 10 \cdot 100 \cdot 6,624 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 196 \cdot 10^{12} \text{ s}^{-1} \cdot 4 \cdot 10^{12} \text{ s}^{-1} = \underline{\underline{1,039 \text{ mW} = +0,16 \text{ dBm}}}$$

(2 v enačbi je zaradi obeh polarizaciji)

(U/15/2/01/5)

Disperzijo v enorodovnem vlaknu koristno uporabimo za zmanjševanje presluha pri valvnodolžinskem multipleksu v ojačevani prekooceanski optični zvezi na razdalji $l=5000$ km. Izračunajte časovno razliko Δt v času potovanja signalov na sosednjih kanalih, ki so razmaknjeni za $\Delta f=200$ GHz pri osrednji frekvenci $f_0=194$ THz. Vlakno ima v tem frekvenčnem pasu povprečni disperzijski koeficient $D=18$ ps/(nm·km).

$$\lambda = \frac{c_0}{f} \rightarrow \frac{d\lambda}{df} = -\frac{c_0}{f^2} \rightarrow \Delta\lambda = \frac{c_0}{f^2} \cdot \Delta f = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{(194 \cdot 10^{12} \text{ /s})^2} \cdot 200 \cdot 10^9 \text{ /s} = \underline{1,59 \text{ nm}}$$

$$\Delta t = D \cdot \Delta\lambda \cdot l = 18 \text{ ps/(nm} \cdot \text{km)} \cdot 1,59 \text{ nm} \cdot 5000 \text{ km} = \underline{\underline{143,5 \text{ ns}}}$$

(U/26/6/02/5)

Visokozmogljivo $C=40$ Gbit/s optično zvezo omejuje polarizacijska disperzija vlakna s povprečnim koeficientom $D_{\text{PMD}}=0,2$ ps/ $\sqrt{\text{km}}$. Določite razdaljo med regeneraciji signala, če naj razširitev impulzov ne preseže ene tretjine bitne periode! Upoštevajte tudi trikratni varnostni faktor za vršno vrednost polarizacijske disperzije glede na njeno povprečno vrednost!

$$\Delta t = D_{\text{PMD}} \sqrt{l} = \frac{1}{3} \cdot \frac{T}{3} = \frac{1}{9C} \rightarrow l = \frac{1}{(9CD_{\text{PMD}})^2} = \underline{\underline{193 \text{ km}}}$$

(U/14/3/03/5)

Na koncu podmorskega prekooceanskega kabla z $N=150$ odseki dolžine $l=50$ km izmerimo šumno moč $P=+0$ dBm. Kolikšna je pasovna širina $\Delta\lambda$ Er^{3+} laserskih ojačevalnikov z idealnim šumnim številom $F=3$ dB na osrednji valovni dolžini $\lambda=1,55$ μm ? Ojačevalniki natančno nadomestijo slabljenje kabla $a=0,2$ dB/km. ($h=6,624 \cdot 10^{-34}$ Js, $c=3 \cdot 10^8$ m/s)

$$\underline{P = 1 \text{ mW}}$$

$$G = a \cdot l = 0,2 \text{ dB/km} \cdot 50 \text{ km} = \underline{10 \text{ dB}} = 10$$

$$P \approx 2NGhfB \rightarrow \Delta\lambda = \frac{P\lambda^3}{2NGhc_0^2} = \underline{\underline{20,8 \text{ nm}}}$$

(U/18/6/03/5)

V visokozmogljivem WDM sistemu s številnimi svetlobnimi ojačevalniki v pasu $\lambda=1,55 \mu\text{m}$ vzpostavimo pomožno službeno zvezo male zmogljivosti $C=155 \text{ Mbit/s}$ za nadzor sistema s cenanim neposredno moduliranim DFB laserjem. DFB laser sicer niha na enem rodu, vendar neposredna modulacija toka povzroča frekvenčno modulacijo s kolebom v pasu $\Delta f=50 \text{ GHz}$. Izračunajte domet službene zveze po NZDSF vlaknu s koeficientom disperzije $D=+7 \text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$, če v službeni zvezi barve disperzije vlakna ne kompenziramo! ($\Delta t_{\text{max}}=T_{\text{bit}}/3$)

Frekvenčni pas $\Delta f=50 \text{ GHz}$ predstavlja valovnodolžinski pas $\Delta\lambda = \Delta f \cdot \frac{\lambda^2}{c_0} = \underline{0,4 \text{ nm}}$

$$\Delta t_{\text{max}} = \frac{T_{\text{bit}}}{3} = \frac{1}{3C} = D \cdot \Delta\lambda \cdot l$$

$$l = \frac{1}{3CD \cdot \Delta\lambda} = \underline{\underline{767 \text{ km}}}$$

(V/7/6/10/1)

Preko razdalje $l=100 \text{ km}$ želimo vzpostaviti optično zvezo z enorodovnim optičnim vlaknom pri valovni dolžini $\lambda=1550 \text{ nm}$. Spektralna širina svetlobnega izvora znaša $\Delta\lambda=0,1 \text{ nm}$. Disperzije v vlaknu ne kompenziramo, zato zahtevamo, da se začetni impulz ne razširi na več kot eno tretjino trajanja enega bita podatkov. Izračunaj za koliko se spremeni zmogljivost zveze $C=?$ v bit/s, če se zaradi spremembe temperature vlaknu za $\Delta T=100^\circ\text{C}$ spremeni vrednost disperzijskega koeficienta vlakna iz $D_{T=-30^\circ\text{C}}=17 \text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$ na $D_{T=70^\circ\text{C}}=16,8 \text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$.

$$\frac{\Delta t}{l \cdot \Delta\lambda} = D$$

$$\Delta t = \frac{T}{3} = \frac{1}{3C}$$

$$\frac{1}{l \cdot \Delta\lambda \cdot 3C} = D \quad \rightarrow \quad C_1 = \frac{1}{l \cdot \Delta\lambda \cdot 3D_{T=-30^\circ\text{C}}}$$

$$C_2 = \frac{1}{l \cdot \Delta\lambda \cdot 3D_{T=70^\circ\text{C}}}$$

$$\Delta C = C_2 - C_1 = \frac{1}{3l \cdot \Delta\lambda} \left(\frac{1}{D_{T=70^\circ\text{C}}} - \frac{1}{D_{T=-30^\circ\text{C}}} \right) = \frac{1}{3 \cdot 100 \text{ km} \cdot 0,1 \text{ nm}} \left(\frac{1}{16,8 \text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})} - \frac{1}{17 \text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})} \right)$$

$$\underline{\underline{\Delta C = 23,3 \text{ Mbit/s}}}$$