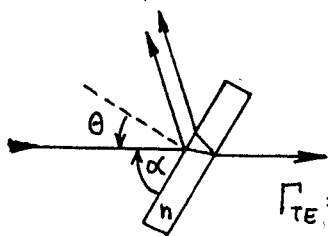


Rešitev pisnega izpita iz OPTIČNIH KOMUNIKACIJ - 30/6/1998

①



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

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

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

$$\Gamma_{TE} = \frac{\cos \theta - \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}}{\cos \theta + \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}} = \frac{1 - n^2}{1 + n^2} = -0.376 \quad \theta = \arccos \frac{1}{\sqrt{n^2 + 1}} = 0.983 \text{rd} = 56.3^\circ$$

$$\alpha = \frac{\pi}{2} - \theta = 33.7^\circ = 0.588 \text{rd}$$

$$a = 10 \log (1 - |\Gamma_{TE}|^2)^2 = \underline{\underline{-1.39 \text{ dB}}}$$

② $NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \sqrt{1.487^2 - 1.482^2} = \underline{\underline{0.122}}$

$$V = k_0 a NA = \frac{2\pi}{\lambda_0} a NA \rightarrow 2a = \frac{V \lambda_0}{\pi NA} = \frac{2.405 \cdot 1.3 \cdot 10^{-6} \text{ m}}{\pi \cdot 0.122} = \underline{\underline{8.17 \mu\text{m}}}$$

③ $F(\theta_x, \theta_y) = \frac{\sin(\frac{k w}{2} \cos \theta_x)}{\frac{k w}{2} \cos \theta_x} \cdot \frac{\sin(\frac{k h}{2} \cos \theta_y)}{\frac{k h}{2} \cos \theta_y} \rightarrow \theta_x = \arccos \frac{1.392 \lambda}{\pi w} = \underline{\underline{1.51 \text{rd}}}$

$$\theta_y = \arccos \frac{1.392 \lambda}{\pi h} = \underline{\underline{1.38 \text{rd}}}$$

$$\alpha_x = \pi - 2\theta_x = 0.145 \text{rd} = 6.6^\circ \quad \alpha_y = \pi - 2\theta_y = 0.386 \text{rd} = 22^\circ$$

④ $P_N = \Delta f k_B T$; $U_N = \sqrt{P_N \cdot R}$; $R \approx \frac{1}{2\pi \Delta f C}$; $U_N = \sqrt{\frac{k_B T}{2\pi C}} = \underline{\underline{8.56 \mu\text{V}}}$

$$U_s = \frac{Q}{C} = \frac{N q Q_e}{C} ; N = \frac{U_s C}{q Q_e} = U_N \sqrt{\frac{P_s}{P_N}} \frac{C}{q Q_e} = \underline{\underline{1255 \text{ [fotonov/enica]}}}$$

⑤ $G = P_{12} - P_{vh} = 30 \text{ dB}$; notranje ojačenje $G' = G + (F - 3 \text{ dB}) = 31 \text{ dB} = \underline{\underline{1259}}$

črpalka 980 nm $\rightarrow \mu \approx 1$; $\nu = \frac{c_0}{\lambda_0} = \underline{\underline{193.5 \text{ THz}}}$; $\Delta \nu = \nu \frac{\Delta \lambda}{\lambda_0} = \underline{\underline{3.12 \text{ THz}}}$

$$P_n = \mu (G - 1) h \nu \Delta \nu = \underline{\underline{0.5 \text{ mW} = -3 \text{ dBm}}}$$

Rešitev pisnega izpita iz OPTIČNIH KOMUNIKACIJ - 23/9/1998

$$\textcircled{1} \Gamma_{TE} = \frac{\cos\theta - \sqrt{n^2 - \sin^2\theta}}{\cos\theta + \sqrt{n^2 - \sin^2\theta}} = \underline{-0.24} \quad ; \quad \Gamma_{TM} = \frac{n^2\cos\theta - \sqrt{n^2 - \sin^2\theta}}{n^2\cos\theta + \sqrt{n^2 - \sin^2\theta}} = \underline{0.16}$$

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

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

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

$$S_{TE} = S_{0TE} (1 - |\Gamma_{TE}|^2)^2 = \underline{444 \text{ W/m}^2}, \quad S_{TM} = S_{0TM} (1 - |\Gamma_{TM}|^2)^2 = \underline{475 \text{ W/m}^2}, \quad S = S_{TE} + S_{TM} = \underline{919 \text{ W/m}^2}$$

$$\textcircled{2} a = 10 \log \left(\frac{r_2}{r_1} \right)^2 = \underline{-1.94 \text{ dB}} \quad ; \quad n \approx 1.5 \text{ (steklena vlakna)}$$

$$\Delta_1 = \frac{NA_1^2}{2n}, \quad \Delta_2 = \Delta_1 \left(\frac{r_2}{r_1} \right)^2 \quad ; \quad NA_2 = \sqrt{2n\Delta_2} = NA_1 \left(\frac{r_2}{r_1} \right) = \underline{0.1875}$$

$\rightarrow$ da je profil bamaega kolektorskega posameznika

$$\textcircled{3} \Delta f = \frac{c}{2l} = \frac{c_0}{2ln} = \underline{135 \text{ GHz}} \quad ; \quad \left| \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \right| = \left| \frac{\Delta f}{f} \right| \rightarrow \Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{c_0} \Delta f = \underline{0.76 \text{ nm}}$$

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

$$\textcircled{4} P_{SE} = 30 P_{NE} = 30 \cdot \Delta f k_B T = 30 \cdot \frac{C}{2} k_B T = \underline{6.21 \cdot 10^{-17} \text{ W}}$$

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

$$C = 100 \text{ pF}$$

$$P_{SE} = \frac{U^2}{R} = \frac{(Q/C)^2}{1/2\pi\omega C} = 2\pi\omega f \frac{1}{C} (Q_e N_e)^2 \rightarrow N_e = \frac{1}{|Q_e|} \sqrt{\frac{P_{SE} C}{2\pi\omega f}} = \underline{8787} \quad ; \quad N_f = \frac{N_e}{\eta} = \underline{12553}$$

$$P_{so} = \frac{P_{00} G_0}{4\pi r^2} A = \frac{N_f h c_0}{\lambda} \rightarrow r = \sqrt{\frac{P_{00} G_0 A \lambda}{4\pi N_f h c_0}} = \underline{16.97 \text{ m}} \quad P_{00} = 1 \text{ mW za enico}$$

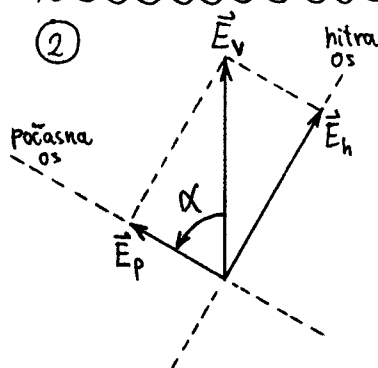
$$\textcircled{5} \Delta t = D \cdot l \cdot \Delta\lambda = \frac{T}{3} = \frac{1}{3c} \rightarrow l = \frac{1}{3c D \Delta\lambda} = \underline{7.4 \text{ km}}$$

Rešitev pisnega izpita iz OPTIČNIH KOMUNIKACIJ - 18/12/1998

① $n_1 = \sqrt{n_0 n_2} = \sqrt{n_2} = \sqrt{1.5} = \underline{1.22}$

(Glej naprimer "Vaje iz Teorije elektromagnetike", stran 203/vaja 209)

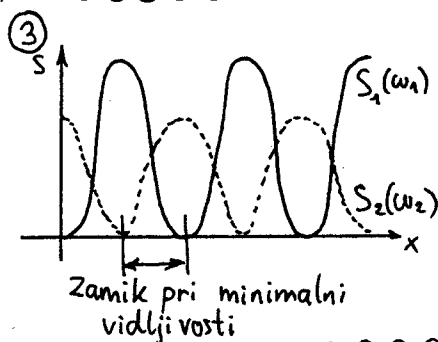
$$d = \frac{\lambda_1}{4} = \frac{\lambda_0}{4 n_1} = \frac{632.8 \text{ nm}}{4 \cdot 1.22} = \underline{127.33 \text{ nm}}$$



$$R_{db} = 20 \log \frac{|\vec{E}_h|}{|\vec{E}_p|} = 20 \log \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha} = 20 \log (\tan \alpha)$$

$$\alpha = \arctg \left(10^{\frac{R_{db}}{20}} \right) = \arctg \left(10^{\frac{1}{20}} \right) = \arctg (1.12) = \underline{0.8428 \text{ rd}}$$

$$\Delta \alpha = \alpha - \frac{\pi}{4} = \underline{0.0544 \text{ rd} = 3.29^\circ}$$



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

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

$$P_1 = \frac{(V+1)P}{2} = \underline{1.6 \text{ mW}} ; P_2 = \frac{(1-V)P}{2} = \underline{0.4 \text{ mW}}$$

④ $P_i = P_v \frac{1 + \cos \left(\pi \frac{U_k}{U_{pi}} \right)}{2}$

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

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

$$u(t) = U \cos \omega t ; \frac{\pi}{U_{pi}} u(t) = \pi \frac{U}{U_{pi}} \cos \omega t ; \cos^3 \alpha = \frac{3}{4} \cos \alpha + \frac{1}{4} \cos 3\alpha$$

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

$$\frac{P_{LW}}{P_{3H}} = \left| \frac{-\frac{1}{2} \pi \frac{U}{U_{pi}} + \frac{1}{12} \left(\pi \frac{U}{U_{pi}} \right)^3}{\frac{1}{48} \left(\pi \frac{U}{U_{pi}} \right)^3} \right| = \frac{24 - 3 \left(\pi \frac{U}{U_{pi}} \right)^2}{\left(\pi \frac{U}{U_{pi}} \right)^2} = \underline{291.7}$$

Razmerje amplitud svetlobne moči

⑤ AM: $B = C = 106 \text{ Hz}$; $T = \frac{1}{C} = 100 \text{ ps}$

$$\Delta t = D \cdot L \cdot \Delta \lambda ; \Delta \lambda = \lambda \cdot \frac{B}{f} = \frac{\lambda^2 B}{C_0} = \frac{(1550 \text{ nm})^2 \cdot 10 \cdot 10^3 \text{ Hz}}{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}} = \underline{0.08 \text{ nm}}$$

$$L = \frac{\Delta t}{D \Delta \lambda} = \frac{T/2}{D \cdot \Delta \lambda} = \frac{50 \cdot \text{ps}}{18 \text{ ps/km} \cdot \text{nm} \cdot 0.08 \text{ nm}} = \underline{34.7 \text{ km}}$$

$D = 18 \text{ ps/(km} \cdot \text{nm)}$ (napaka ps namesto ns v podatkih naloge, štejem pravilno 34.7 m)

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!

$$|r| = \left| \frac{1-n}{1+n} \right| = \left| \frac{1-1.5}{1+1.5} \right| = 0.2 \quad S' = S(1 - |r|^2) = 1000 \text{ W/m}^2 \cdot (1 - 0.04) = \underline{960 \text{ W/m}^2}$$

$$Z = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon}} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \cdot \frac{1}{n} = \frac{Z_0}{n} \quad E' = \sqrt{2ZS'} = \sqrt{\frac{2Z_0 S'}{n}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 377 \Omega \cdot 960 \text{ W}}{1.5}} = \underline{695 \text{ V/m}}$$

2. Stakleno 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 $f=300\text{ THz}$!

Višji rodovi pri $V=2.405$ $NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \approx n_1 \sqrt{2\Delta} = \underline{0.116}$

$$V = k_0 a NA \rightarrow a = \frac{V}{k_0 NA} = \frac{V}{2\pi f \sqrt{\mu_0 \epsilon_0} NA} = \frac{V c_0}{2\pi f NA} = \frac{2.405 \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{2\pi \cdot 300 \cdot 10^{12} \text{ /s} \cdot 0.116} = \underline{3.29 \mu\text{m}}$$

3. Razdalja med zrcali helij-neonske laserske cevi (dolžina cevi) znaša $l=320\text{ mm}$. 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.

$$\Delta f = \frac{c}{2l} = \frac{c_0}{2l n} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{2 \cdot 0.32 \text{ m} \cdot 1} = \underline{468.75 \text{ MHz}}$$

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

$$P = \frac{P_0}{2} [1 + \cos(\pi \frac{U}{U_{pi}})] \rightarrow U = \frac{U_{pi}}{\pi} \arccos(2 \frac{P}{P_0} - 1) = \frac{6 \text{ V}}{\pi} \arccos(2 \cdot 0.8 - 1) = \underline{1.77 \text{ V}}$$

5. Povprečna svetlobna moč signala na vходу sprejemnika znaša $P_s=-40\text{ dBm}$ pri bitni hitrosti $C=140\text{ Mbit/s}$ (dvojiški prenos) in valovni dolžini (v praznem prostoru) $\lambda=1.3\text{ mikrometra}$. Izračunajte število fotonov, ki predstavljajo logično enico, če signal v povprečju vsebuje enako število enic in ničel. Ničlo predstavlja ugasnjen izvor svetlobe. ($h=6.624 \cdot 10^{-34}\text{ Js}$)

$$P_s = -40\text{ dBm} = 100\text{ nW} = 10^{-7}\text{ W}$$

$$N = 2 \frac{P_s}{C \cdot h} = \frac{2 P_s}{C \cdot h f} = \frac{2 P_s \lambda}{C \cdot h c_0} = \frac{2 \cdot 10^{-7} \text{ W} \cdot 1.3 \cdot 10^{-6} \text{ m}}{140 \cdot 10^6 \text{ /s} \cdot 6.624 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}} = \underline{9346}$$

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.

$$\Theta = 0 \Rightarrow |r_{TE}|^2 = |r_{TM}|^2 = \frac{n-1}{n+1} = 0.2$$

$$\alpha = 10 \log \left(1 - 2 |r|^2 \right) = 10 \log \left(1 - 2 \cdot 0.2^2 \right) = \underline{\underline{-0.362 \text{ dB}}}$$

2 odboja brez interference

2. Gradientno optično vlakno 62.5/125 ima jedro premera 62.5 μm s parabolničnim prifilom lomnega količnika. Določite numerično aperturo vlakna NA na oddaljenosti $d=20 \mu\text{m}$ od osi vlakna, če znaša numerična apertura na osi $NA_0=0.2$! $2a=62.5 \mu\text{m} \rightarrow a=31.25 \mu\text{m}$

$$NA_0 = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \approx n_1 \sqrt{2\Delta_0}; \Delta = \Delta_0 \left(1 - \left(\frac{d}{a} \right)^2 \right)$$

$$NA(d) \approx n_1 \sqrt{2\Delta} \approx n_1 \sqrt{2\Delta_0 \left(1 - \left(\frac{d}{a} \right)^2 \right)} = NA_0 \sqrt{1 - \left(\frac{d}{a} \right)^2} = 0.2 \sqrt{1 - \left(\frac{20}{31.25} \right)^2} = \underline{\underline{0.154}}$$

3. Polprevodniški laser za nazivno valovno dolžino $\lambda=1.3 \mu\text{m}$ (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 $n=3.7$.

$$\Delta f = \frac{c}{2l} = \frac{c_0}{2ln} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{2 \cdot 200 \cdot 10^{-6} \text{ m} \cdot 3.7} = \underline{\underline{202.7 \text{ GHz}}}$$

$$\Delta \lambda = \lambda_0 \frac{\Delta f}{f_0} = \frac{\lambda_0^2}{c_0} \Delta f = \frac{(1.3 \cdot 10^{-6} \text{ m})^2}{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}} \cdot 202.7 \cdot 10^9 \text{ s}^{-1} = \underline{\underline{1.142 \text{ nm}}}$$

4. Silicijeva PIN fotodiode ima odzivnost $I/P=0.3 \text{ A/W}$ pri valovni dolžini $\lambda=850 \text{ nm}$ (v praznem prostoru). Določite kvantni izkoristek (η) fotodiode! Kolikšna je teoretsko največja možna odzivnost $(I/P)_{\text{max}}$ idealne fotodiode pri navedeni valovni dolžini? ($h=6.624 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$, $q_e=1.6 \cdot 10^{-19} \text{ As}$)

$$\left(\frac{I}{P} \right)_{\text{max}} = \frac{|q_e|}{W_f} = \frac{|q_e|}{h f_0} = \frac{|q_e| \lambda_0}{h c_0} = \frac{1.6 \cdot 10^{-19} \text{ As} \cdot 850 \cdot 10^{-9} \text{ m}}{6.624 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}} = \underline{\underline{0.684 \text{ A/W}}}$$

$$\eta = \frac{I/P}{(I/P)_{\text{max}}} = \frac{0.3 \text{ A/W}}{0.684 \text{ A/W}} = \underline{\underline{43.8\%}}$$

5. Določite frekvenco zvočnega valovanja v akustooptičnem modulatorju svetlobe, da znaša kot med uklonjenima žarkoma prvega reda $\alpha=1$ stopinja (v zraku)! Hitrost zvočnega valovanja v snovi (steklu) znaša $v=3.5 \text{ km/s}$, lomni količnik stekla je $n=1.5$, kot izvor svetlobe uporabimo HeNe laser ($\lambda=632.8 \text{ nm}$).

$$\sin \frac{\alpha_0}{2} = \frac{\lambda_0}{\Lambda} \rightarrow \Lambda = \frac{\lambda_0}{\sin \frac{\alpha_0}{2}} = \frac{632.8 \cdot 10^{-9} \text{ m}}{\sin 0.5^\circ} = \underline{\underline{72.5 \mu\text{m}}}$$

$$f = \frac{v}{\Lambda} = \frac{3.5 \cdot 10^3 \text{ m/s}}{72.5 \cdot 10^{-6} \text{ m}} = \underline{\underline{48.3 \text{ MHz}}}$$

Rešitev pisnega izpita iz OPTIČNIH KOMUNIKACIJ (UNI) - 9/6/1999

$$\textcircled{1} Q_v = 0 \rightarrow E_{vH} = -jE_{wv} ; E_{OH} = E_{vH} \cdot \Gamma_{TE} ; E_{OV} = E_{wv} \cdot \Gamma_{TM} ; \vec{A}_D = \frac{1}{\sqrt{2}} (\vec{A}_V - j\vec{A}_H) ; \vec{A}_L = \frac{1}{\sqrt{2}} (\vec{A}_V + j\vec{A}_H)$$

$$E_{OD} = E_O \cdot \vec{A}_D^* = \frac{1}{\sqrt{2}} (E_{wv} \Gamma_{TM} + j E_{vH} \Gamma_{TE}) = \frac{E_{wv}}{\sqrt{2}} (\Gamma_{TM} + \Gamma_{TE}) ; E_{OL} = E_O \cdot \vec{A}_L^* = \frac{E_{wv}}{\sqrt{2}} (\Gamma_{TM} - \Gamma_{TE})$$

$$Q_O = \frac{E_{OL}}{E_{OD}} = \frac{\Gamma_{TM} - \Gamma_{TE}}{\Gamma_{TM} + \Gamma_{TE}} ; \Gamma_{TM} = \frac{n^2 \cos \theta - \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}}{n^2 \cos \theta + \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}} ; \Gamma_{TE} = \frac{\cos \theta - \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}}{\cos \theta + \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}}$$

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

$$\textcircled{2} NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \sqrt{1.48^2 - 1.47^2} = 0.172 ; \Omega = 2\pi(1 - \cos \alpha) = 2\pi(1 - \sqrt{1 - NA^2}) = 0.093 \text{ srd}$$

$$\eta = \frac{\Omega}{4\pi} = \frac{0.093 \text{ srd}}{4\pi} = 0.00743 = 0.743\%$$

$$\textcircled{3} d\varphi = k_0 \Delta n dz ; \Delta \varphi = \int_0^L k_0 \Delta n dz = \int_0^L \frac{2\pi}{\lambda_0} n_2 \frac{P}{A} dz = \frac{2\pi n_2}{\lambda_0 A} \int_0^L P dz ; P = P_0 e^{-\alpha z} ; \alpha = \frac{\ln 10}{10} a$$

$$\Delta \varphi = \frac{2\pi n_2 P_0}{\lambda_0 A \alpha} (1 - e^{-\alpha L}) = \frac{2\pi \cdot 3.2 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2 \cdot 10^{-2} \text{ W} (1 - e^{-9.21 \cdot 10^{-5} \text{ m}^{-1} \cdot 5 \cdot 10^{-4} \text{ m}})}{W \cdot 1.3 \cdot 10^{-6} \text{ m} \cdot 80 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2 \cdot 9.21 \cdot 10^{-5} \text{ m}^{-1}} = 0.208 \text{ rd}$$

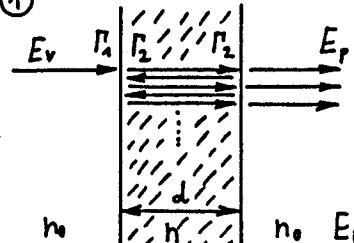
$$\textcircled{4} \lambda_0 = 1.3 \mu\text{m} ; \eta = 40\% ; U_N = \sqrt{\frac{k_B T}{2\pi C_0}} = \sqrt{\frac{1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K} \cdot 100 \text{ K}}{2\pi \cdot 2 \cdot 10^{-12} \text{ As/V}}} = 10.48 \mu\text{V} ; U_s = U_N \sqrt{\frac{P_s}{P_N}} = 57.4 \mu\text{V}$$

$$N_f = \frac{U_s C_0}{|Q_e| \eta} = 1025 ; P_0 = \frac{1}{2} N_f W_f C = \frac{1}{2} \frac{N_f h c_0 C}{\lambda_0} = 10.97 \text{ nW} = -49.6 \text{ dBm}$$

$$\textcircled{5} D = \frac{\Delta t}{\Delta \lambda \cdot l} = \frac{\frac{1}{3C}}{\frac{\Delta f \lambda_0^2}{c_0} \cdot l} = \frac{c_0}{\Delta f \lambda_0^2 3C l} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{300 \cdot 10^9 \text{ s}^{-1} \cdot (1300 \cdot 10^{-9} \text{ m})^2 \cdot 40 \cdot 10^3 \text{ m} \cdot 3 \cdot 25 \cdot 10^5 \text{ s}^{-1}}$$

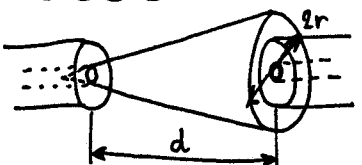
$$D = 1.127 \cdot 10^{-6} \frac{\text{s}}{\text{m}^2} = 1.127 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$$

Rešitev pisnega izpita iz OPTIČNIH KOMUNIKACIJ (UNI) - 14/9/1999

①  $E_p = E_v (1 + \Gamma_1)(1 + \Gamma_2) e^{-jkd} [1 + \Gamma_2^2 e^{-2jkd} + \Gamma_2^4 e^{-4jkd} + \dots]$
 $E_p = E_v \frac{(1 + \Gamma_1)(1 + \Gamma_2) e^{-jkd}}{1 - \Gamma_1^2 e^{-2jkd}}$; $\Gamma_1 = \frac{1-n}{1+n} = -0.2$; $\Gamma_2 = \frac{n-1}{n+1} = -\Gamma_1 = +0.2$
 $E_p = E_v e^{-jkd} \frac{1 - \Gamma_1^2}{1 - \Gamma_1^2 e^{-2jkd}}$; $E_{pmax} = E_v e^{-jkd} @ e^{-jkd} = 1 \rightarrow kd = m\pi$; $d = m \cdot \frac{\lambda}{2}$

$E_{pmin} = E_v e^{-jkd} \frac{1 - \Gamma_1^2}{1 + \Gamma_1^2} @ e^{-jkd} = -1 \rightarrow kd = m\pi + \frac{\pi}{2}$; $d = m \cdot \frac{\lambda}{2} + \frac{\lambda}{4}$; $R = 20 \log \left| \frac{E_{pmax}}{E_{pmin}} \right| = 20 \log \frac{1 + \Gamma_1^2}{1 - \Gamma_1^2} = 0.695 \text{ dB}$

$\lambda_0 = n\lambda$; $m = \text{int} \left[\frac{2dn}{\lambda} \right] = 6000$; $\lambda_{max} = \frac{2dn}{m} = 500 \text{ nm}$; $\lambda_{min} = \frac{4dn}{2m+1} = 499.958 \text{ nm}$; $\Delta\lambda = \lambda_{max} - \lambda_{min} = 0.042 \text{ nm}$

②  $r = a + dNA$
 $a_{dB} \approx 10 \log \left(\frac{r}{a} \right)^2 = 20 \log \left(1 + \frac{dNA}{a} \right) = 8.3 \text{ dB}$

③ $d\varphi = \alpha U dl$; $\varphi = \alpha U \left| \int_0^L e^{-j\alpha l} dl \right| = \alpha U \frac{\sin(\alpha L/2)}{\alpha L/2} = \alpha U \frac{\sin(\pi f/f_0)}{\pi f/f_0}$; $f_0 = 10 \text{ GHz}$
 $\frac{\sin(\pi f/f_0)}{\pi f/f_0} = 0.907 \rightarrow \pi f/f_0 = 1.392 \rightarrow B = \frac{1.392}{\pi} f_0 = 4.43 \text{ GHz}$; $U_{\pi}(B) = U_{\pi}(0) \cdot \sqrt{2} = 7.07 \text{ V}$

④ $P_{min} = P_{min} + 10 \log \frac{M}{\eta_i} + 10 \log \sqrt{\frac{C_d + C_0}{C_d + C_0}} = -45 \text{ dBm} + 0.58 \text{ dB} - 0.77 \text{ dB} = -45.19 \text{ dBm}$

⑤ $d_s = \frac{10 \log \left(\frac{P_s}{P_n} + \frac{C}{C'} \right)}{a} = \frac{35 - 10 \log(C')}{0.2} \text{ km}$; $d_d = \frac{1}{D \cdot \alpha \lambda \cdot 3C'} = \frac{1}{18 \text{ ps} \cdot 3C'} \text{ km} = \frac{1}{0.05 + C'} \text{ km}$
 enote 6 bit/s

$d_s = d_d \rightarrow 175 - 50 \log C' = 18.519 \frac{1}{C'}$

Številski rešitev : $175 - 50 \log x = \frac{18.519}{x} \rightarrow x_{n+1} = \frac{18.519}{175 - 50 \log x_n}$; $x_0 = 1$

$x_1 = 0.106$; $x_2 = 0.083$; $x_3 = 0.081$; $x_4 = 0.081 \rightarrow C' = 81 \text{ Mbit/s}$

$d_s = d_d = 229 \text{ km}$

1. Nepolarizirana sončna svetloba z gostoto moči $S_v = 1 \text{ kW/m}^2$ vpada pod Brewster-jev kot iz praznega prostora na površino stekla ($n = 1.5$). Določite gostoto moči odbite svetlobe $S_o = ?$ v praznem prostoru!

$$r_{TM} = \frac{n^2 \cos \theta - \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}}{n^2 \cos \theta + \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}} = 0 \rightarrow n^2 \cos^2 \theta = n^2 - \sin^2 \theta \rightarrow (n^2 - 1) \cos^2 \theta = n^2 - 1 \rightarrow \cos^2 \theta = \frac{1}{n^2 + 1}; \sin \theta = \frac{n}{\sqrt{n^2 + 1}}$$

$$r_{TE} = \frac{\cos \theta - \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}}{\cos \theta + \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}} = \frac{1 - \sqrt{n^2(n^2 + 1) - n^2}}{1 + \sqrt{n^2(n^2 + 1) - n^2}} = \frac{1 - n^2}{1 + n^2} = -0.385 \quad S_o = S_v \frac{|r_{TE}|^2 + |r_{TM}|^2}{2} = \underline{\underline{74 \text{ W/m}^2}}$$

2. Lomni količnik jedra mnogorodovnega gradientnega vlakna se spreminja po izrazu:

$$n(r) = 1.5 - (0.0001 * (r^2)) \quad \text{kjer je "r" podan v mikrometrih.}$$

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

$$n_1 = n(r=0) = 1.5 \quad \Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1} = \frac{1.5 - 1.438}{1.5} = \underline{\underline{0.042}}$$

$$n_2 = n(r = \frac{d}{2}) = 1.438 \quad NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \underline{\underline{0.428}}$$

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

$$P = P_{max} \frac{1}{2} \left(1 + \cos \left(\pi \frac{U}{U_{pi}} \right) \right) \quad P_1 = P_{max} \cdot 0.983 \quad \left(\frac{P_1}{P_0} \right)_{dB} = 10 \log \frac{P_1}{P_0} = 10 \log \frac{0.983}{0.017} = \underline{\underline{17.6 \text{ dB}}}$$

$$U_1 = \frac{U_{pi} - U_s}{2} = 0.5 \text{ V} \quad P_0 = P_{max} \cdot 0.017$$

$$U_0 = \frac{U_{pi} + U_s}{2} = 5.5 \text{ V}$$

4. Sprejemniški PIN-FET modul za $C = 622 \text{ Mbit/s}$ vsebuje fotodiodo s kvantnim izkoristkom $\eta = 75\%$ in transimpedančni ojačevalnik $Z = 1 \text{ kohm}$. Določite napetost signala na izhodu ($U_{vrh-vrh} = ?$), če predstavlja logično enico $N = 3000$ fotonov valovne dolžine $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$, logično ničlo pa odsotnost svetlobe na vhodu vohodu sprejemnika! ($h = 6.624 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$, $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$)

$$Q_1 = \eta N / |q_e| \quad I_1 = \frac{Q_1}{T} = Q_1 C \quad U_1 = Z I_1 = \eta N / |q_e| C Z =$$

$$U_0 = 0 \text{ V} \quad U_1 = 0.75 \cdot 3000 \cdot 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ As} \cdot 622 \cdot 10^6 / \text{s} \cdot 1000 \Omega = \underline{\underline{224 \mu\text{V}}}$$

5. Optični ojačevalnik z erbijevim vlaknom črpamo z laserjem moči $P_p = 70 \text{ mW}$ na valovni dolžini $\lambda_{pdp} = 980 \text{ nm}$. Določite izhodno moč ojačevalnika $P_s = ?$ na valovni dolžini signala $\lambda_{ds} = 1550 \text{ nm}$, če ojačevalnik izkorišča $\eta = 90\%$ fotonov črpalka!

$$\Delta W_p = h f_p = \frac{h c_0}{\lambda_p} \quad P_s = \eta P_p \frac{\Delta W_s}{\Delta W_p} = \eta P_p \frac{\lambda_p}{\lambda_s} = 0.9 \cdot 70 \text{ mW} \cdot \frac{980 \text{ nm}}{1550 \text{ nm}} = \underline{\underline{39.8 \text{ mW}}}$$

$$\Delta W_s = h f_s = \frac{h c_0}{\lambda_s}$$

1. Nepolarizirana sončna svetloba z gostoto moči $S_v = 1 \text{ kW/m}^2$ vpada pod Brewster-jev kot na gladino tekočine z lomnim količnikom $n = 1.3$. Določite gostoto moči odbite svetlobe $S_o = ?$ v paznem prostoru nad tekočino!

$$\theta_B = \arctan n = 0.915 \text{ rad} \quad S_o = \frac{1}{2} S_v |\Gamma_{TE}|^2 = \frac{1}{2} \cdot 1 \text{ kW/m}^2 \cdot |-0.257|^2 = 32.9 \text{ W/m}^2$$

$$\Gamma_{TE} = \frac{\cos \theta - \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}}{\cos \theta + \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}} = -0.257$$

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 $S = S_o \cdot \cos(\theta)$ na valovni dolžini $\lambda = 900 \text{ nm}$. Odboj svetlobe pri vstopu v vlakno zanemarimo. $\alpha = \arcsin NA = 0.201 \text{ rad}$

$$\eta = \left(\frac{a}{r}\right)^2 \frac{\int_0^\alpha S(\theta) \sin \theta d\theta}{\int_0^\pi S(\theta) \sin \theta d\theta} = \left(\frac{a}{r}\right)^2 \frac{\frac{1}{4} - \frac{1}{4} \cos 2\alpha}{\frac{1}{4} + \frac{1}{4}} = \frac{1}{2} \left(\frac{a}{r}\right)^2 (1 - \cos 2\alpha) = 0.44\%$$

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

3. Izračunajte širino spektra $\Delta\lambda = ?$ polprevodniškega laserja s Fabry-Perot-ovim rezonatorjem 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 $n = 3.7$.

$$\Delta f = N \frac{c_0}{n \cdot 2l} = 25 \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{3.7 \cdot 2 \cdot 200 \cdot 10^{-6} \text{ m}} = 5.07 \text{ THz}$$

$$\Delta \lambda = \frac{\lambda^2}{c_0} \Delta f = \frac{(1.3 \cdot 10^{-6} \text{ m})^2}{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}} \cdot 5.07 \cdot 10^{12} \text{ /s} = 28.5 \text{ nm}$$

4. Optični PIN-FET sprejemniški modul vsebuje električni ojačevalnik s šumno temperaturo $T = 150 \text{ K}$. Skupna kapacitivnost fotodiode in vhoda ojačevalnika znaša $C = 3 \text{ pF}$. Določite razmerje Penice/Pšuma v decibelih na električnem izhodu sprejemnika! Kvantni izkoristek fotodiode znaša $\eta = 0.7$, logično enico pa predstavlja $N = 2000$ fotonov valovne dolžine $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$. ($h = 6.624 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$, $k_B = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$ in $q_e = -1.6 \cdot 10^{-19} \text{ As}$)

$$U_s = \frac{N \eta |q_e|}{C} = \frac{2000 \cdot 0.7 \cdot 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ As}}{3 \cdot 10^{-12} \text{ As/V}} = 74.7 \mu\text{V} \quad \frac{P_s}{P_n} = \frac{U_s^2}{U_n^2}$$

$$U_n = \sqrt{\frac{k_B T}{2\pi C}} = \sqrt{\frac{1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K} \cdot 150 \text{ K}}{2\pi \cdot 3 \cdot 10^{-12} \text{ As/V}}} = 10.48 \mu\text{V} \quad \left(\frac{P_s}{P_n}\right)_{\text{dB}} = 20 \log \frac{U_s}{U_n} = 17 \text{ dB}$$

5. Določite hitrost zvočnega valovanja $v = ?$ v akustooptičnem modulatorju, če se žarka prvega reda uklonita za kot $\alpha = 0.1$ stopinje! Kot izvor svetlobe uporabimo rdeči HeNe laser z valovno dolžino $\lambda = 632.8 \text{ nm}$, piezoelektrični pretvornik pa krmilimo z radiofrekvenčnim generatorjem s frekvenco $f = 12 \text{ MHz}$.

$$\sin \alpha = \frac{\lambda}{\Lambda} ; \Lambda = \frac{v}{f} = \Lambda f = \frac{\lambda f}{\sin \alpha} = \frac{632.8 \cdot 10^{-9} \text{ m} \cdot 12 \cdot 10^6 \text{ s}^{-1}}{\sin 0.1^\circ} = 4351 \text{ m/s}$$

1. Polarizacijo HeNe laserske cevi za $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ določa Brewster-jevo okno v obliki primerno nagnjene steklene ploščice znotraj laserskega resonatorja. Določite dodatno vstavitevno slabljenje okna za neželjeno polarizacijo $a = ?$ v dB! Kolikšen mora biti kot alfa med ploščico in osjo cevi, če je lomni količnik ploščice $n = 1.6$?

$$\theta = \arctan n = 1.012 \text{ rad} = 58^\circ$$

$$a = (1 - |r_{TE}|^2) = 0.653$$

$$r_{TE} = \frac{\cos \theta - \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}}{\cos \theta + \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}} = -0.438$$

$$a_{dB} = 10 \log a = -1.85 \text{ dB}$$

$$\alpha = \frac{\pi}{2} - \theta = 0.558 \text{ rad} = 32^\circ$$

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 bojo izgube svetlobe pri prestopu v novo vlakno najmanjše!

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

$$NA \approx n \sqrt{2\Delta} \rightarrow \frac{NA'}{NA} = \frac{n \sqrt{2\Delta'}}{n \sqrt{2\Delta}} = \sqrt{\frac{\Delta'}{\Delta}} = \frac{a'}{a} \rightarrow NA' = NA \frac{2a'}{2a} = 0.15 \cdot \frac{62.5 \mu\text{m}}{50 \mu\text{m}} = 0.1875$$

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

$$P = \alpha (I - I_p); I \geq I_p \quad \left\{ \begin{array}{l} \frac{P'}{P} = \frac{I - I_p'}{I - I_p} \rightarrow P' = P \frac{I - I_p'}{I - I_p} = 3 \text{ mW} \frac{30 \text{ mA} - 20 \text{ mA}}{30 \text{ mA} - 15 \text{ mA}} = 2 \text{ mW} \\ P' = \alpha (I - I_p'); I \geq I_p' \end{array} \right.$$

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 pritisknjene zaporne napetosti kvantni izkoristek $\eta = 0.6$. ($h = 6.624 \times 10^{-34} \text{ Js}$, $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$)

$$P = hf \frac{dN}{dt} = h \frac{c}{\lambda} \frac{dN}{dt} \quad M = \frac{I h c}{q |Q_e| P \lambda} = \frac{10 \cdot 10^{-6} \text{ A} \cdot 6.624 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{0.6 \cdot 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ As} \cdot 10^{-6} \text{ W} \cdot 1.3 \cdot 10^{-6} \text{ m}} = 15.9$$

$$I = M q |Q_e| \frac{dN}{dt} = M q |Q_e| \frac{P \lambda}{h c}$$

5. Izračunajte zmogljivost $C = ?$ optične zveze po enorodovnem vlaknu s koeficientom disperzije $D = 18 \text{ ps/nm/km}$! V oddajniku uporabimo laser na valovni dolžini $\lambda = 1550 \text{ nm}$ in širino spektra $\Delta \lambda = 3 \text{ nm}$. Zmogljivost zveze nam omejuje razširitev impulzov v sprejemniku, ki naj ne presega ene tretjine bitne periode. $\ell = 100 \text{ km}$

$$\Delta t = \ell \cdot \Delta \lambda \cdot D = 100 \text{ km} \cdot 3 \text{ nm} \cdot 18 \text{ ps/nm/km} = 5.4 \text{ ns} ; C = \frac{1}{3 \Delta t} = \frac{1}{3 \cdot 5.4 \cdot 10^{-9} \text{ s}} = 61.7 \text{ Mbit/s}$$

1. Pokončno polarizirano valovanje vpada 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!

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

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

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

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

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

$$\theta = \arcsin \sqrt{\frac{(1-\Gamma)^2 n^4 - (1+\Gamma)^2 n^2}{(1-\Gamma)^2 n^4 - (1+\Gamma)^2}} = \arcsin(0.55; 0.83) = \underline{\underline{33.4^\circ; 62.8^\circ}}$$

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!

$$a_2 = a_1 \left(\frac{f_2}{f_1} \right)^4 = a_1 \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right)^4 = 0.35\text{dB/km} \left(\frac{1.3\mu\text{m}}{0.85\mu\text{m}} \right)^4 = \underline{\underline{1.915\text{dB/km}}}$$

3. Sklopnik z dvema enorodovnjima vlaknoma ima pri valovni dolžini svetlobe $\lambda=1550\text{nm}$ utripno dolžino $LAMBDA=10\text{mm}$. Izračunajte najmanjšo potrebno dolžino sklopnika $l=?$, da se v drugo vlakno sklopi $a=1\%$ svetlobne moči iz prvega vlakna!

$$P_s = P_v \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos\left(2\pi \frac{l}{\Lambda}\right) \right) \rightarrow l = \frac{\Lambda}{2\pi} \arccos\left(1 - 2 \frac{P_s}{P_v}\right) = \frac{10\text{mm}}{2\pi} \arccos(1 - 2 \cdot 0.01) = \underline{\underline{0.319\text{mm}}}$$

4. Sprejemniški PIN-FET modul za $C=622\text{Mbit/s}$ vsebuje fotodiodo s kvantnim izkoristkom $\eta=80\%$ in transimpedančni ojačevalnik s transimpedanco $Z=1\text{kohm}$. Določite napetost signala na izhodu (Uvrh-vrh=?), če pripeljemo na vhod dvojiški signal s povprečno optično močjo $P_0=-30\text{dBm}$ in enakim številom enic ter ničel! ($c=3\text{E}+8\text{m/s}$, $h=6.624\text{E}-34\text{Js}$, $\lambda=1300\text{nm}$)

$$U = ZI = Z \frac{|Q_e| \eta P_0}{W} = Z \frac{|Q_e| \eta \lambda}{hc} 2P_0 = 10^3 \Omega \frac{1.6 \cdot 10^{-19} \text{As} \cdot 0.8 \cdot 1.3 \cdot 10^{-6} \text{m}}{6.624 \cdot 10^{-34} \text{Js} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{m/s}} 2 \cdot 10^{-6} \text{W} = \underline{\underline{1.67\text{mV}}}$$

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

5. Na vhod idealnega optičnega ojačevalnika z Er^{3+} vlaknom in črpalko na 980nm (popolna inverzna naseljenost, $F=3\text{dB}$) pripeljemo signal z valovno dolžino $\lambda=1550\text{nm}$ in močjo $P=-10\text{dBm}$. Izračunajte razmerje signal/šum na izhodu ojačevalnika, kjer večino šuma predstavlja ojačeno spontano sevanje laserskega ojačevalnika v pasovni širini $B=4\text{THz}$! ($c=3\text{E}+8\text{m/s}$, $h=6.624\text{E}-34\text{Js}$)

$$P = -10\text{dBm} = 100\mu\text{W}; P_s = G \cdot P$$

$$P_s = \frac{P}{h f B} = \frac{P \lambda}{h c B} = \frac{0.1 \cdot 10^{-3} \text{W} \cdot 1.55 \cdot 10^{-6} \text{m}}{6.624 \cdot 10^{-34} \text{Js} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{m/s} \cdot 4 \cdot 10^{12} \text{Hz}} = 195 = \underline{\underline{22.9\text{dB}}}$$

$P_u \approx G h f B$; $G \gg 1$
(ENA POLARIZACIJA)

1. Nepolarizirana sončna svetloba z gostoto pretoka moči $S_0 = 1 \text{ kW/m}^2$ vpadajo pod Brewster-jevim kotom na okno iz stekla z lomnim količnikom $n = 1.6$. Izračunajte gostoto moči prepuščene svetlobe $S = ?$ z upoštevanjem odbojev pri vstopu in izstopu iz okna! Odboje višjih redov (večkratne odboje) zanemarite!

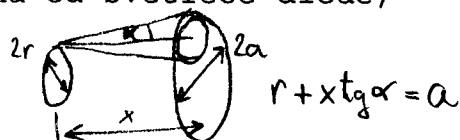
$$\theta_B = \arctg n = 1.0122 \text{ rad} = 57.99^\circ$$

$$\Gamma_{TE} = \frac{\cos \theta - \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}}{\cos \theta + \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}} = -0.4382$$

$$S = S_0 \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2} (1 - |\Gamma_{TE}|^2)^2 \right) = 1 \text{ kW/m}^2 \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2} 0.808^2 \right) = \underline{\underline{826 \text{ W/m}^2}}$$

2. Izračunajte sklopni izkoristek $\eta = ?$ svetleče diode na plastično optično vlakno s premerom jedra $2a = 1 \text{ mm}$ in numerično aperturo $NA = 0.47$. Svetleča dioda se obnaša kot kroglast izvor s polmerom $r = 100 \mu\text{m}$ in enakomerno seva v vse smeri. Koliko lahko odmaknemo $x = ?$ začetek vlakna od svetleče diode, da se sklopni izkoristek ne zmanjša?

$$\eta = \frac{\Omega}{4\pi} = \frac{2\pi(1 - \cos \alpha)}{4\pi} = \frac{1}{2} (1 - \sqrt{1 - NA^2}) = \underline{\underline{5.87\%}}$$

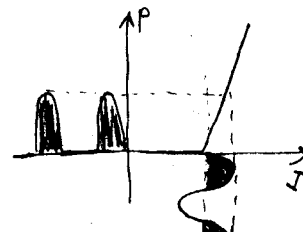


$$x = \frac{a - r}{\tg \alpha} = (a - r) \frac{\sqrt{1 - NA^2}}{NA} = 0.4 \text{ mm} \cdot \frac{\sqrt{1 - 0.47^2}}{0.47} = \underline{\underline{0.75 \text{ mm}}}$$

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

$$P = \alpha (I - I_p) \rightarrow \alpha = \frac{P_0}{I_0 - I_p} = \frac{3 \text{ mW}}{35 \text{ mA} - 20 \text{ mA}} = \underline{\underline{0.2 \text{ W/A}}}$$

$$\bar{P} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} I_{eff} \sqrt{2} \sin(\omega t) \alpha d(\omega t) = \frac{\sqrt{2}}{\pi} I_{eff} \alpha = \underline{\underline{0.9 \text{ mW}}}$$



4. Izračunajte kvantni izkoristek $\eta = ?$ PIN fotodiode, ki daje pri vpadni optični moči $P = -25 \text{ dBm}$ na valovni dolžini $\lambda = 1550 \text{ nm}$ enosmerni foto-tok $I = 2.2 \mu\text{A}$. Temni tok fotodiode je zanemarljivo majhen, površina čipa pa je prekrita z antirefleksnim slojem. ($c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$, $h = 6.624 \times 10^{-34} \text{ Js}$)

$$I = \frac{|Q_{el}|}{W_f} \eta P = \frac{|Q_{el}| \eta P}{h f} \rightarrow \eta = \frac{I h c}{|Q_{el}| P \lambda} = \frac{2.2 \cdot 10^{-6} \text{ A} \cdot 6.624 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{1.6 \cdot 10^{-19} \text{ As} \cdot 3.16 \cdot 10^{-6} \text{ W} \cdot 155 \cdot 10^{-9} \text{ m}} = \underline{\underline{55.8\%}}$$

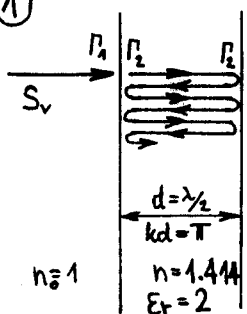
$$P = -25 \text{ dBm} = 3.16 \mu\text{W}$$

5. Izračunajte domet $d = ?$ optične zveze po enorodovnem vlaknu, ki ima nekompenzirano disperzijo $D = 17 \text{ ps/nm/km}$. Kot oddajnik uporabimo neposredno modulirani FP laser s širino spektra $\Delta \lambda = 2 \text{ nm}$ na srednji valovni dolžini $\lambda = 1550 \text{ nm}$. Bitna hitrost znaša $C = 622 \text{ Mbit/s}$. Domet zveze omejuje razširitev impulzov zaradi disperzije, ki naj ne presega ene tretjine bitne periode.

$$\Delta t = D \Delta \lambda d = \frac{1}{3C} \rightarrow d = \frac{1}{3C D \Delta \lambda} = \frac{1}{3 \cdot 622 \cdot 10^6 \text{ /s} \cdot 17 \text{ ps/nm/km} \cdot 2 \text{ nm}} = \underline{\underline{15.8 \text{ km}}}$$

Rešitev pisnega izpita iz OPTIČNIH KOMUNIKACIJ (UNI)-20/9/2000

①



$$E_v = \sqrt{2Z_0 S_v} = 868 \text{ V/m}; n = \sqrt{\epsilon_r} = 1.44; \Gamma_1 = \frac{1-n}{1+n} = -0.172; \Gamma_2 = -\Gamma_1 = +0.172$$

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

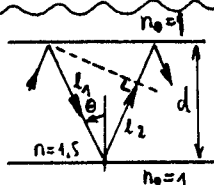
$$E_- = \frac{E_v (1 + \Gamma_1)}{1 - \Gamma_2^2} \Gamma_2 e^{-2jkz} e^{+jkz} = \frac{E_v (1 + \Gamma_1) \Gamma_2}{1 - \Gamma_2^2} e^{jkz}; H_+ = \frac{E_+}{Z}; H_- = -\frac{E_-}{Z}$$

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

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

$$S = (1 + j0.354 \sin(2kz)) \text{ kW/m}^2$$

②



$$l = l_1 + l_2 = \frac{d}{\cos \theta} + \frac{d}{\cos \theta} \cos 2\theta = \frac{d}{\cos \theta} (1 + \cos 2\theta) = 2d \cos \theta; \theta_{\min} = \frac{\pi}{2} \rightarrow l_{\min} = 0$$

$$\theta_{\max} = \arcsin \frac{1}{n} \rightarrow l_{\max} = 2d \sqrt{1 - \left(\frac{1}{n} \right)^2} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ m} \sqrt{1 - \left(\frac{1}{1.5} \right)^2} = 1.491 \text{ mm}$$

$$N = \frac{l_{\max} - l_{\min}}{\lambda} = n \frac{l_{\max} - l_{\min}}{\lambda_0} = 1.5 \frac{1.491 \cdot 10^{-3} \text{ m}}{0.6 \cdot 10^{-6} \text{ m}} = 3727 \leftarrow \frac{TE \text{ ali } TM}{TE + TM} = 2N = 7454$$

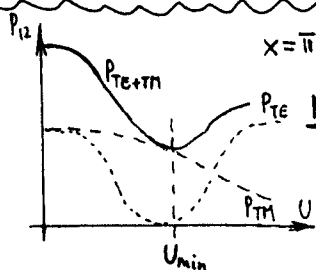
③

Krožna polarizacija:

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

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

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



$$x = \pi \frac{U}{6V}; 0 = f(x) = \sin x + \frac{1}{3} \sin \frac{2}{3} x; f'(x) = \cos x + \frac{2}{3} \cos \frac{2}{3} x$$

$$\text{Newton: } x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)}; x_0 = \pi = 3.141593$$

$$x_1 = 3.541803$$

$$x_2 = 3.548105$$

$$x_3 = 3.548113$$

$$x_4 = 3.548113$$

$$U_{\min} = \frac{6V}{\pi} x = 6.776V$$

$$\frac{P_{\min}}{P_{vh}} = \frac{1}{2} + \frac{1}{4} \cos \pi \frac{U_{\min}}{6V} + \frac{1}{4} \cos \pi \frac{U_{\min}}{15V} = \frac{1}{2} + \frac{1}{4} \cos x + \frac{1}{4} \cos \frac{2}{3} x = 0.308117; 10 \log 0.308117 = -5.11 \text{ dB}$$

④

$$C_1 = C + C_a = 90 \text{ pF}; C_2 = \frac{A'}{A} C + C_a = 300 \text{ pF}; I = \alpha A S_1; I' = \alpha A' S_2$$

$$\frac{U_s'}{U_N} = \frac{\frac{I'}{I} \frac{C_1}{C_2} U_s}{\sqrt{\frac{C_a}{C_2}} U_N} = \frac{U_s}{U_N} \rightarrow I' = I \sqrt{\frac{C_2}{C_1}} \rightarrow S_2 = \frac{A'}{A} \sqrt{\frac{C_2}{C_1}} S_1; d' = d \sqrt{\frac{S_1}{S_2}} = d \sqrt{\frac{A}{A'} \sqrt{\frac{C_1}{C_2}}} = 14.8 \text{ m}$$

⑤

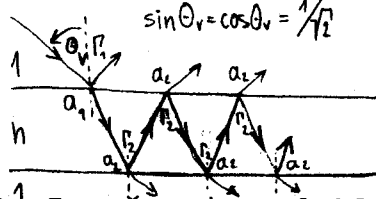
$$P_N = 2 N G h f B = 2 \cdot 10 \cdot 100 \cdot 6.624 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 196 \cdot 10^{12} \text{ s}^{-1} \cdot 4 \cdot 10^{12} \text{ s}^{-1} = 1.039 \text{ mW} = +0.16 \text{ dBm}$$

OBE POLARIZACIJSKI
ŠTEVILNO
OBSEKOV

$$G = \frac{1}{\alpha} = +20 \text{ dB} = 100$$

1. Svetlobni žarek vpada pod kotom $\theta = 45^\circ$ 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 šibkješi kot $a = -40\text{dB}$ od moči vpadnega žarka.

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



$$\Gamma_{TE} = \frac{\cos \theta_v - \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_v}}{\cos \theta_v + \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_v}} = -0.303$$

$$\Gamma_{TM} = \frac{n^2 \cos \theta_v - \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_v}}{n^2 \cos \theta_v + \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_v}} = 0.092$$

$$\Gamma_{TE} = -\Gamma_{TE} = 0.303; \Gamma_{TM} = -\Gamma_{TM} = -0.092$$

$$a_{TE} = 10 \log(1 - |\Gamma_{TE}|^2) = -0.413\text{dB}$$

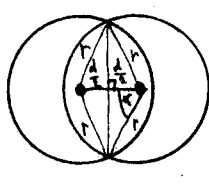
$$a_{TM} = 10 \log(1 - |\Gamma_{TM}|^2) = -0.039\text{dB}$$

$$a_{TE} = 10 \log |\Gamma_{TE}|^2 = -10.361\text{dB}$$

$$a_{TM} = 10 \log |\Gamma_{TM}|^2 = -20.723\text{dB}$$

$N_{TE} = 4 \text{ odboje}; N_{TM} = 2 \text{ odboja}$

2. Izračunajte slabljenje spoja $a = ?$ (v decibelih) 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 $d = 20\mu\text{m}$, 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.



$$a = 10 \log \frac{A_2}{A_1} = 10 \log \frac{991\mu\text{m}^2}{1963\mu\text{m}^2} = -2.97\text{dB}$$

$$A_1 = \pi r^2 = 1963\mu\text{m}^2 \quad \alpha = \arccos \frac{d/2}{r} = 66.422^\circ = 1.159\text{rad}$$

$$A_2 = 2 \left(\alpha r^2 - \frac{d}{2} \sqrt{r^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2} \right) = 2 \left(729.5\mu\text{m}^2 - 229\mu\text{m}^2 \right) = 991\mu\text{m}^2$$

3. Določite izkoristek $\eta = ?$ svetleče diode, ki daje izhodno svetlobno moč $P_o = 100\mu\text{W}$ na povprečni valovni dolžini $\lambda = 900\text{nm}$. Diodo krmilimo s tokom $I = 30\text{mA}$, glavnino padca napetosti dobimo na PN spoju, ostale padce lahko zanemarimo. ($c = 3\text{E}+8\text{m/s}$, $h = 6.624\text{E}-34\text{Js}$)

$$P_e = UI = \frac{W}{|q_e|} I = \frac{hf}{|q_e|} I = \frac{hcI}{\lambda |q_e|} = \frac{6.624 \cdot 10^{-34} \text{Js} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{m/s} \cdot 30 \cdot 10^{-3} \text{A}}{0.9 \cdot 10^{-6} \text{m} \cdot 1.6 \cdot 10^{-19} \text{As}} = 41.4\text{mW}$$

$$\eta = \frac{P_o}{P_e} = \frac{0.1\text{mW}}{41.4\text{mW}} = 0.242\%$$

4. Določite optično moč $P_o = ?$ (v dBm) na vходу transpimedančnega 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). ($c = 3\text{E}+8\text{m/s}$, $h = 6.624\text{E}-34\text{Js}$, $q_e = -1.6\text{E}-19\text{As}$)

$$I = \frac{U}{R_t} = \frac{0.1\text{V}}{10000\Omega} = 10\mu\text{A}; W = hf = \frac{hc}{\lambda}; I = |q_e| \frac{dN_e}{dt}; N_e = \eta N_f$$

$$P_o = W \frac{dN_e}{dt} = W \cdot \frac{1}{\eta} \cdot \frac{dN_e}{dt} = \frac{hc}{\lambda} \cdot \frac{1}{\eta} \cdot I = \frac{6.624 \cdot 10^{-34} \text{Js} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{m/s} \cdot 10 \cdot 10^{-6} \text{A}}{1.3 \cdot 10^{-6} \text{m} \cdot 0.7 \cdot 1.6 \cdot 10^{-19} \text{As}} = 13.65\mu\text{W} = -18.6\text{dBm}$$

5. Optična zveza ima zmogljivost $C_1 = 155\text{Mbit/s}$ in domet $d_1 = 100\text{km}$, 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 $C_2 = 622\text{Mbit/s}$. Toplotni šum sprejemnika je premosorazmeren pasovni širini, ostale omejitve dometa zanemarimo ter slabljenje vlakna znaša v povprečju $a = 0.35\text{dB/km}$.

$$\Delta a_e = 10 \log \frac{P_{N2}}{P_{N1}} = 10 \log \frac{C_2}{C_1} = 6.035\text{dB} \quad \Delta a_o = \frac{1}{2} \Delta a_e = 3.017\text{dB}$$

ker ne spreminjamo bremenskega upora fotodiode

$$\Delta l = \frac{\Delta a_o}{a} = 8.621\text{km} \quad d_2 = d_1 - \Delta l = 91.4\text{km}$$

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

$$\begin{aligned} \Gamma_{\text{TM}} = 0 &\rightarrow n^2 \cos \theta - \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta} = 0 \rightarrow \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta} = n^2 \cos \theta \quad \pm \sqrt{2 \frac{P_o}{P_v}} (1+n^2) = 1-n^2 \\ \Gamma_{\text{TE}} &= \frac{\cos \theta - \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}}{\cos \theta + \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}} = \frac{\cos \theta - n^2 \cos \theta}{\cos \theta + n^2 \cos \theta} = \frac{1-n^2}{1+n^2} \quad n^2 (\pm \sqrt{2 \frac{P_o}{P_v}} + 1) = 1 \mp \sqrt{2 \frac{P_o}{P_v}} \\ n &= \sqrt{\frac{1 \mp \sqrt{2 \frac{P_o}{P_v}}}{1 \pm \sqrt{2 \frac{P_o}{P_v}}}} \\ \frac{P_o}{P_v} &= \frac{1}{2} (|\Gamma_{\text{TE}}|^2 + |\Gamma_{\text{TM}}|^2) \rightarrow |\Gamma_{\text{TE}}| = \sqrt{2 \frac{P_o}{P_v}} = \pm \frac{1-n^2}{1+n^2} \quad n = 0,867, 1,153 \end{aligned}$$

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 $V = 2,405$).

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

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

3. Optični reflektometer vsebuje polprevodniški laser, ki proizvede svetlobni impulz z močjo $P_o = 10 \text{mW}$ v trajanju $t = 100 \text{ns}$. 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 $\alpha = 10 \text{dB}$ ter laser in fotodiodo spojimo na merjenec s 50/50 (3dB) vlakenskim sklopnikom! ($\lambda = 1,3 \mu\text{m}$, $h = 6,624 \text{E-34 Js}$)

$$\begin{aligned} \text{LASER} &\rightarrow \text{50/50} \rightarrow \text{10dB} \rightarrow \text{1} \quad W_0 = P_o \cdot t = 10 \text{mW} \cdot 100 \text{ns} = 1 \text{nJ} \\ W_b &= W_0 \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{40} \cdot |\Gamma|^2 \cdot \frac{1}{10} \cdot \frac{1}{2} = W_0 \cdot \frac{1}{400} \cdot 0,04 = W_0 \cdot 10^{-4} = 0,1 \text{pJ} \end{aligned}$$

$$|\Gamma| = \frac{n-1}{n+1} = 0,2 \quad N = \frac{W_b}{h f} = \frac{W_b \lambda}{h c_0} = \frac{10^{-4} \text{J} \cdot 1,3 \cdot 10^{-6} \text{m}}{6,624 \cdot 10^{-34} \text{Js} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{m/s}} = 6,54 \cdot 10^5$$

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

$$\text{Verjetnost napake: } 1 \rightarrow 0: P = 10^{-6} = e^{-N} \rightarrow N_e = -\ln 10^{-6} = 13,82 \quad N_f = \frac{2}{\eta} N_e = 138,2$$

$$P_s = \frac{1}{2} C W = \frac{1}{2} C \cdot N_f h f = \frac{C N_f h c_0}{2 \lambda} = \frac{10^3 \text{s} \cdot 138,2 \cdot 6,624 \cdot 10^{-34} \text{Js} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{m/s}}{2 \cdot 632,8 \cdot 10^{-9} \text{m}} = 2,2 \cdot 10^{-14} \text{W}$$

5. Disperzijo v enorodovnem vlaknu koristno uporabimo za zmanjševanje presluha pri valovnodolžinskem multipleksu v ojačevani prekooceanski optični zvezi na razdalji $l = 5000 \text{km}$. Izračunajte časovno razliko $\Delta t=?$ v času potovanja signalov na sosednjih kanalih, ki so razmaknjeni za $\Delta f = 200 \text{GHz}$ pri osrednji frekvenci $f_0 = 194 \text{THz}$. Vlakno ima v tem frekvenčnem pasu povprečni disperzijski koeficient $D = 18 \text{ps/nm/km}$.

$$\lambda = \frac{c_0}{f} \rightarrow \frac{d\lambda}{df} = -\frac{c_0}{f^2} \rightarrow \Delta \lambda = \frac{c_0}{f^2} \Delta f = \frac{3 \cdot 10^8 \text{m/s}}{(194 \cdot 10^{12} \text{s}^{-1})^2} 200 \cdot 10^9 \text{s}^{-1} = 1,59 \text{nm}$$

$$\Delta t = D \cdot \Delta \lambda \cdot l = 18 \text{ps/nm/km} \cdot 1,59 \text{nm} \cdot 5000 \text{km} = 143,5 \text{ns}$$

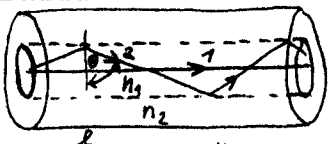
1. Nepolarizirana sončna svetloba vpada iz praznega prostora pod pravim kotom na prozorno snov z neznanim lomnim količnikom n ? Določite lomni količnik snovi n , če znaša moč odbitega žarka $P_o = 0.02 \cdot P_v$ moči vpadnega žarka!

$$\theta = 0 \rightarrow |r_{TE}| = |r_{TM}| = \left| \frac{n-1}{n+1} \right| = |r| \quad n \left(1 - \sqrt{\frac{P_o}{P_v}} \right) = 1 + \sqrt{\frac{P_o}{P_v}}$$

$$\frac{P_o}{P_v} = |r|^2 \Rightarrow \frac{n-1}{n+1} = \pm \sqrt{\frac{P_o}{P_v}}; \quad n-1 = (n+1) \sqrt{\frac{P_o}{P_v}} \quad n = \frac{1 + \sqrt{\frac{P_o}{P_v}}}{1 - \sqrt{\frac{P_o}{P_v}}} = \frac{1 + \sqrt{0.02}}{1 - \sqrt{0.02}} = \underline{\underline{1.33}}$$

(nožna je rešitev $n_1 = 0.75$, težko najti takšno snov!)

2. Mnogorodovno optično vlakno ima jedro premera $2a = 50 \mu m$ in oblogo iz čistega kremenovega stekla z lomnim količnikom $n_2 = 1.46$. Izračunajte lomni količnik jedra n_1 ?, če se na dolžini $l = 10 km$ svetlobni impulz razširi za $\Delta t = 1 \mu s$ zaradi razlik v hitrosti širjenja različnih rodov!



$$t_1 = \frac{l}{c_1} = \frac{l n_1}{c_0} \quad n_1^2 - n_1 n_2 - \frac{\Delta t c_0}{l} n_2 = 0$$

$$t_2 = \frac{l}{c_1 \sin \theta} = \frac{l n_1^2}{c_0 n_2} \quad n_1^2 - 1.46 n_1 - 0.0438 = 0$$

$$\sin \theta = \frac{n_2}{n_1} \quad \Delta t = t_2 - t_1 = \frac{l}{c_0} n_1 \left(\frac{n_1}{n_2} - 1 \right) \quad n_1 = \frac{1.46 + \sqrt{1.46^2 + 4 \cdot 0.0438}}{2} = \underline{\underline{1.4894}}$$

3. Polprevodniški laser za valovno dolžino $\lambda = 1.3 \mu m$ 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) $l = 0.3 mm$ ter širina optičnega spektra $\Delta \lambda = 0.5 nm$!

$$f = \frac{c_0}{\lambda} \rightarrow \frac{df}{d\lambda} = -\frac{c_0}{\lambda^2} \rightarrow \Delta f = \frac{c_0}{\lambda^2} \cdot \Delta \lambda = \frac{3 \cdot 10^8 m/s}{(1.3 \cdot 10^{-6} m)^2} \cdot 0.5 \cdot 10^{-9} m = \underline{\underline{88.6 GHz}}$$

f_0 = razmik med rodovi

$$f = m \cdot f_0 = m \cdot \frac{c}{2l n} = m \cdot \frac{c_0}{2l n} \rightarrow f_0 = \frac{c_0}{2l n} = \frac{3 \cdot 10^8 m/s}{2 \cdot 0.3 \cdot 10^{-3} m \cdot 3.7} = \underline{\underline{135.16 GHz}}$$

$$N = \frac{\Delta f}{f_0} = \frac{88.6}{135.1} = \underline{\underline{0.657 < 1}}$$

Laser niha na enem rodni!

4. Izračunajte izhodno napetost U ? APD-FET modula, ki vsebuje plazovno fotodiodo s kvantnim izkoristkom $\eta_a = 0.8$ pri valovni dolžini $\lambda = 1.3 \mu m$ in transimpedančni ojačevalnik z $R_t = 1 k\Omega$! Na vhod sprejemnika pripeljemo svetlobno moč $P_o = 1 \mu W$, zaporno napetost na plazovni diodi pa nastavimo za faktor multiplikacije $M = 20$. ($h = 6.624 \cdot 10^{-34} Js$, $c = 3 \cdot 10^8 m/s$, $q_e = -1.6 \cdot 10^{-19} As$)

$$Q = N_e q_e M = N_p q_p M = \frac{W_o}{h f} \eta_a M = \frac{W_o \lambda_0 \eta_a M}{h c_0}; \quad I = \frac{dQ}{dt} = \frac{\lambda_0 \eta_a M}{h c_0} \frac{dW_o}{dt} = \frac{P_o \lambda_0 \eta_a M}{h c_0}; \quad U = I R_t$$

$$U = \frac{P_o \lambda_0 \eta_a M R_t}{h c_0} = \frac{10^{-6} W \cdot 1.3 \cdot 10^{-6} m \cdot 0.8 \cdot 1.6 \cdot 10^{-19} As \cdot 20 \cdot 10^3 \Omega}{6.624 \cdot 10^{-34} Js \cdot 3 \cdot 10^8 m/s} = \underline{\underline{0.0167 V = 16.7 mV}}$$

5. Izračunajte potrebno moč črpalke P_c ? laserskega ojačevalnika z erbijevim vlaknom, ki dela na valovni dolžini $\lambda = 980 nm$! 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 $\eta_a = 90\%$ fotonov črpalke, dodatne izgube sklopa črpalke in izhodnega izolatorja pa znašajo $a = 1 dB$.

$$a = 1 dB = 1.259 \quad P_c = P_i \frac{\lambda_s}{\lambda_c} \cdot \frac{1}{\eta} \cdot a = 25 mW \cdot \frac{1550 nm}{980 nm} \cdot \frac{1}{0.9} \cdot a = \underline{\underline{55.3 mW}}$$

1. Optično vlakno izdelamo s tehnologijo MCVD tako, da postopek začnemo s cevjo iz čistega kremenčevega stekla z notranjim premerom $d_1=15\text{mm}$ in zunanjim premerom $d_2=25\text{mm}$. Kako debelo $h=?$ oblogo z dodatkom germanijevega oksida moramo nanesti na notranjo steno cevi, da bo končni izdelek enorodovno vlakno s premerom jedra $d_j=10\text{mikrometrov}$ in zunanjim premerom $d=125\text{mikrometrov}$? Koliko km vlakna $l=?$ dobimo iz cevi dolžine $l_c=1\text{m}$?

$$\frac{A_i}{A_o} = \frac{d_i^2}{d^2 - d_j^2} = \frac{d_i^2 - (d_i - 2h)^2}{d_i^2 - d_j^2} = \frac{4dh - 4h^2}{d_i^2 - d_j^2} \quad 4h^2 - 60h + \frac{100}{15625 - 100} \cdot (625 - 225) = 0 \quad V_o = \pi(d_i^2 - d_j^2)l_c = \pi(d^2 - d_j^2)l$$

$$4h^2 - 60h + 2.576 = 0 \quad h = \frac{60 \pm \sqrt{3600 - 41.22}}{8} = 0.043\text{mm} \quad l = \frac{d_i^2 - d_j^2}{d^2 - d_j^2} l_c = \frac{625 - 225}{0.045625 - 0.0001} \cdot 1\text{m}$$

$$l = 25765\text{m} = 25.8\text{km}$$

2. Svetlobni signal dobimo po optičnem vlaknu s premerom jedra $d_1=50\text{mikrometrov}$ in stopničastim lomnim likom z numerično aperturo $NA_1=0.15$. Vstopno vlakno zavarimo na vlakno fotodetektorja s premerom jedra $d_2=62.5\text{mikrometra}$, stopničastim lomnim likom in numerično aperturo $NA_2=0.22$. Izračunajte izgubo signala na spoju različnih vlaken v decibelih $a=?$, če je zvar res kvalitetno opravljen in sam zvar ne vnaša dodatnih izgub!

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

3. Polprevodniški laser vsebuje Fabry-Perot-ov rezonator, 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 $\lambda=1.3\text{mikrometra}$. Lasersko ojačenje v valovodu pri izbranem delovnem toku doseže $G=5000\text{dB/m}$ za TE polarizacijo.

$$n = \sqrt{\epsilon_r} = 3.742 \quad a_{\text{dB}} = 10 \log_{10} |r_{\text{TE}}|^2 = -4.758\text{dB}$$

$$r_{\text{TE}} = \frac{1-n}{1+n} = -0.578 \quad 2L \cdot G + a_{\text{dB}} = 0 \rightarrow L = -\frac{a_{\text{dB}}}{G} = \frac{0.952 \cdot 10^{-3}}{5} = 0.352\text{mm}$$

4. Izračunajte domet $r=?$ daljinca za televizor, ki ima oddajnik s svetlečo diodo z vršno močjo (enica) $P_o=10\text{mW}$ na valovni dolžini $\lambda=900\text{nm}$! Sprejemnik je opremljen s fotodiodo s površino $A=1\text{mm}^2$ in kvantnim izkoristkom $\eta_a=0.7$. 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 $R=1\text{kbit/s}$.

$$(h=6.624 \cdot 10^{-34}\text{Js}, c=3 \cdot 10^8\text{m/s}, Q_e=-1.6 \cdot 10^{-19}\text{As})$$

$$Q = CU_s, \quad W = N_f h f = N_s h \frac{c}{\lambda}, \quad P_s = W \cdot R, \quad P_s = P_o \frac{A}{4\pi r^2} \rightarrow r = \sqrt{\frac{P_o A}{P_s 4\pi}} = 4.02\text{m}$$

$$N_e = \frac{Q}{Q_e}, \quad P_s = \frac{C U_s}{\eta_a Q_e} h \frac{c}{\lambda} R = 4.929 \cdot 10^{-14}\text{W}$$

$$N_s = \frac{N_e}{\eta_a}$$

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

$$\Delta t = (D_1 l_1 + D_2 l_2 + D_3 l_3) \Delta\lambda = (17 \cdot 20 - 5 \cdot 40 + 5 \cdot 10) \cdot 1\text{ps} = 150\text{ps} \quad C = \frac{1}{3\Delta t} = 1.75\text{Gbit/s}$$

1. Zelen žarek ($\lambda = 0.5 \mu\text{m}$ v zraku) v stekelni 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!

$$k_o^2 = k_{x0}^2 + k_{z0}^2 = k_{x0}^2 + k_z^2 \quad k_{x0} = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{1 - n^2 \sin^2 \theta} \quad a = 20 \log \left| \frac{E}{E_0} \right| = -60\text{dB} \rightarrow \left| \frac{E}{E_0} \right| = 10^{-3} = e^{-|k_x|d}$$

$$k_o = \frac{2\pi}{\lambda_0} \quad |k_{x0}| = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{n^2 \sin^2 \theta - 1} \quad d = \frac{1}{|k_x|} \ln 10^3 = \frac{\lambda \ln 10^3}{2\pi \sqrt{n^2 \sin^2 \theta - 1}} = \underline{\underline{506\text{nm}}}$$

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

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 čimmanjše!

$$NA(r) = \sqrt{n_1^2(r) - n_2^2} \approx \sqrt{2n \Delta n(r)} \quad \Delta n_{\text{max}} = \frac{\Delta n(r)}{1 - \left(\frac{r}{d_2/2}\right)^2} = \frac{\Delta n_1}{1 - \left(\frac{d_1/2}{d_2}\right)^2}$$

$$\Delta n(r) = \Delta n_{\text{max}} \left(1 - \left(\frac{r}{d_2/2}\right)^2\right) \quad NA_{\text{max}} \approx \sqrt{2n \Delta n_{\text{max}}} = \frac{\sqrt{2n} \cdot \sqrt{\frac{NA_1^2}{2n}}}{\sqrt{1 - \left(\frac{d_1/2}{d_2}\right)^2}} = \frac{NA_1}{\sqrt{1 - \left(\frac{d_1/2}{d_2}\right)^2}} = \frac{0.1}{\sqrt{1 - 0.64}} = \underline{\underline{0.167}}$$

3. Smerni diagram polprevodniškega laserja z valovno dolžino $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$ ima -3dB širino snopa (kot med obema -3dB točkama izbranega prereza smernega diagrama) $\alpha_1 = 10^\circ$ in $\alpha_2 = 50^\circ$ v ravnini H. Izračunajte širino $w = ?$ in višino $h = ?$ izstopne ploskvice ob predpostavki, da je izstopna ploskva približno enakomerno in sofazno osvetljena! (Rešitev enačbe $\sin(x)/x = 0.707$ je $x = 1.392$)

$$F = \left(1 + \cos \theta\right) \frac{\sin\left(\frac{kw}{2} \cos \theta_x\right)}{\frac{kw}{2} \cos \theta_x} \frac{\sin\left(\frac{kh}{2} \cos \theta_y\right)}{\frac{kh}{2} \cos \theta_y} \quad W = \frac{\lambda x}{\pi \sin \frac{\alpha_1}{2}} = \frac{1.3 \mu\text{m} \cdot 1.392}{\pi \sin \frac{10^\circ}{2}} = \underline{\underline{6.61 \mu\text{m}}}$$

$$h = \frac{\lambda x}{\pi \sin \frac{\alpha_2}{2}} = \frac{1.3 \mu\text{m} \cdot 1.392}{\pi \sin \frac{50^\circ}{2}} = \underline{\underline{1.36 \mu\text{m}}}$$

-3dB točka: $x = \frac{kw}{2} \cos\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\alpha_1}{2}\right) = \frac{kw}{2} \sin \frac{\alpha_1}{2}$

4. Hitra fotodioda s kvantnim izkoristkom $\eta_a = 0.4$ na valovni dolžini $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ je opremljena s elektrodami v obliki prenosnega voda s karakteristično impedanco $Z_k = 50 \Omega$, ki je na enem koncu zaključen 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 vходу sprejemnika, ki da razmerje $U_{\text{sen}}/U_{\text{neff}} = 20$ na električnem izhodu! ($h = 6.624 \cdot 10^{-34}\text{Js}$, $q_e = -1.6 \cdot 10^{-19}\text{As}$, $k_b = 1.38 \cdot 10^{-23}\text{J/K}$)

$$P_n = B k_b T = 10^{10} \cdot 1.38 \cdot 10^{-23} \cdot 500 = \underline{\underline{69\text{pW}}} \quad P = \frac{I_{s1}}{2\eta} \cdot \frac{W_s}{|Q_e|} = \frac{I_{s1} h C}{2\eta \lambda |Q_e|} =$$

$$U_N = \sqrt{P_n R} = \sqrt{69 \cdot 10^{-12} \cdot 50} = \underline{\underline{58.7 \mu\text{V}}}$$

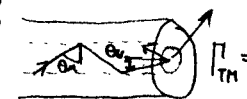
$$U_{s1} = 20 U_N = 1.174\text{mV} \quad I_{s1} = \frac{U_{s1}}{R_{12}} = \underline{\underline{47 \mu\text{A}}} = \frac{49 \cdot 10^{-6} \cdot 6.624 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{Js}}{2 \cdot 0.4 \cdot 1.55 \cdot 10^{-6} \cdot 1.6 \cdot 10^{-19} \text{As}} = \underline{\underline{47 \mu\text{W}}}$$

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

$$\Delta t = 0 = \Delta l (l_1 D_1 + l_2 D_2 + l_3 D_3 + l_k D_k) \rightarrow l_k = - \frac{l_1 D_1 + l_2 D_2 + l_3 D_3}{D_k} = \underline{\underline{9.65\text{km}}}$$

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!

$$r_1 = \frac{n_1 - 1}{n_1 + 1} = 0.194 \quad \left\{ \begin{array}{l} \sin \theta_m = \frac{n_2}{n_1} = 0.993 = \cos \theta_v \\ r_{TE} = \frac{\cos \theta_v - \sqrt{\frac{1}{4} - \sin^2 \theta_v}}{\cos \theta_v + \sqrt{\frac{1}{4} - \sin^2 \theta_v}} = 0.197 \\ r_{TM} = \frac{\frac{1}{4} \cos \theta_v - \sqrt{\frac{1}{4} - \sin^2 \theta_v}}{\frac{1}{4} \cos \theta_v + \sqrt{\frac{1}{4} - \sin^2 \theta_v}} = -0.190 \end{array} \right.$$

$$a_1 = |r_1|^2 = 3.75\% \quad a_{TE} = |r_{TE}|^2 = 3.9\% \quad a_{TM} = |r_{TM}|^2 = 3.6\%$$


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 $d_n=15\text{mm}$ in zunanjim premerom $d_z=25\text{mm}$. 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 $d_v=125\mu\text{m}$ dobimo numerično aperturo $\text{NA}=0.1$ in mejno valovno dolžino višjih rodov $\lambda=1.3\mu\text{m}$!

$$V = 2.405 = k_0 a \text{NA} = \frac{2\pi}{\lambda_0} a \text{NA} \rightarrow a = \frac{2.405 \lambda_0}{2\pi \text{NA}} = 4.976\mu\text{m} \quad d \approx \frac{(d_z^2 - d_n^2) \cdot a^2}{(d_v^2 - 4a^2) \cdot d_n}$$

Enaka razmerja pomeni:

$$\frac{\pi a^2}{\pi (d_v/2)^2 - \pi a^2} = \frac{\pi (d_z/2)^2 - \pi (d_v/2)^2}{\pi (d_z/2)^2 - \pi (d_v/2)^2} \rightarrow \frac{4a^2}{d_v^2 - 4a^2} = \frac{4dd_n - 4d^2}{d_z^2 - d_n^2} \approx \frac{4dd_n}{d_z^2 - d_n^2} \quad d \approx 42.5\mu\text{m}$$

3. Polprevodniški laser vsebuje Fabry-Perot-ov resonator, 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 $\lambda=1.3\mu\text{m}$!

$$r = \frac{n-1}{n+1} = \frac{\sqrt{\epsilon_r}-1}{\sqrt{\epsilon_r}+1} = 0.578 \quad G/l = \frac{-[|r|^2]_{\text{dB}}}{l} = \frac{4.752\text{dB}}{500\mu\text{m}} = 9517\text{dB/m}$$

$$|r|^2 = 0.334 = -4.758\text{dB}$$

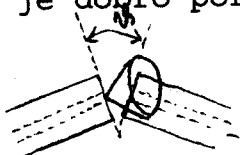
4. Optični sprejemnik je izdelan kot APD-FET modul s fotodiodo s kvantnim izkoristkom $\eta=0.7$ in faktorjem multiplikacije $M=10$. Električno vezje je izvedeno kot transimpedančni ojačevalnik z $R_t=10\text{k}\Omega$. Izračunajte vhodno moč optičnega signala $P_o=?$ z valovno dolžino $\lambda=1.55\mu\text{m}$, ki na izhodu sprejemnika da napetost signala $U_s=100\text{mV}$! ($h=6.624\text{E}-34\text{Js}$, $q_e=-1.6\text{E}-19\text{As}$, $c=3\text{E}+8\text{m/s}$)

$$I = \frac{U_s}{R_t} = 10\mu\text{A} \quad P_o = W_f \cdot \frac{dW_f}{dt} = W_f \cdot \frac{1}{\eta} \cdot \frac{1}{M} \cdot \frac{dN_e}{dt} = \frac{h c_0}{\lambda \cdot \eta M} \cdot \frac{I}{|q_e|} = 1.145\mu\text{W} = -29.4\text{dBm}$$

5. Akustooptični modulator vsebuje kot aktivno snov stekleno kocko z lomnim količnikom $n=1.5$, v kateri se širi zvočno valovanje s hitrostjo $v=3.5\text{km/s}$. Na stekleno kocko je pritrjen piezoelektrični pretvornik, ki ga krmilimo s frekvenco $f=100\text{MHz}$. Izračunajte kot uklonjenega žarka prvega reda (Raman-Nath-ov uklon) v zraku za zeleno svetlobo argonskega laserja z valovno dolžino $\lambda=514\text{nm}$!

$$\alpha = \arcsin \frac{\lambda_0}{\Lambda} = \arcsin \frac{\lambda_0 f}{v} = \arcsin \frac{514\text{nm} \cdot 100 \cdot 10^6\text{Hz}}{3.5 \cdot 10^3\text{m/s}} = 14.7\text{mrd} = 0.841^\circ$$

1. Pri spajanju enakih mnogorodovnih vlaken s polmerom sredice $2a=50\text{mikrometrov}$ vnaša velike izgube nagib osi enega vlakna glede na os 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 in svetlobna moč v prvem vlaknu je dobro porazdeljena med rodovi.



$$\Theta \approx \arcsin NA = \arcsin \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \arcsin 0.171 \approx 10^\circ$$

(Točnu račun $\rightarrow$ prekrivanje kvadratičnih kerpic)

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

$$S = \frac{|E|^2}{2Z_0} = \frac{(2 \cdot 10^6 \text{ V/m})^2}{2 \cdot 377} = 5.3 \cdot 10^9 \text{ W/m}^2 \quad P = SA = S \pi a^2 = 0.417 \text{ W}$$

3. Določite izkoristek $\eta=?$ polprevodniškega laserja s Fabry-Perot-ovim rezonatorjem, 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 $R=5\text{ohm}$. ($c=3E+8\text{m/s}$, $h=6.624E-34\text{Js}$)

$$W = h \frac{c}{\lambda} \cdot |Q_d| U \rightarrow U = \frac{hc}{\lambda |Q_d|} = 1.592 \text{ V} \quad \eta = \frac{P_0}{P_e} = 3.3\%$$

$$P_e = IU + I^2 R = 78.6 \text{ mW} + 12.5 \text{ mW} = 92.1 \text{ mW}$$

4. Elektrooptični modulator z Mach-Zehnder-jevim interferometrom na podlagi LiNbO_3 ima zaradi netočnosti polarizacije vhodne svetlobe ugasno razmerje (razmerje moči enica/ničla) $a=15\text{dB}$. Izračunajte svetlobno moč enice $P_1=?$ in ničle $P_0=?$ na izhodu modulatorja, če znaša povprečna svetlobna moč na izhodu modulatorja $P'=1.5\text{mW}$ (50% enic v podatkih)! Modulator krmilimo z najustreznejšim signalom, ki ustreza $U_{\text{PIE}}=7\text{V}$.

$$a = 15\text{dB} = 31.6 \quad P' = \frac{P_1 + P_0}{2} = \frac{aP_0 + P_0}{2} \rightarrow P_0 = \frac{2P'}{a+1} = 92 \mu\text{W}$$

$$P_1 = aP_0 = 2.9 \text{ mW}$$

5. Disperzijo v enorodovnem vlaknu koristno uporabimo za zmanjševanje presluha zaradi nelinearnih pojavov pri ojačevani WDM prekooceanski zvezi na razdalji $l=7000\text{km}$. Izračunajte časovno razliko $\Delta t=?$ v času potovanja signalov na sosednjih svetlobnih nosilcih, ki so razmaknjeni za $\Delta f=100\text{GHz}$ pri osrednji frekvenci $f_0=194\text{THz}$! Vlakno ima v tem frekvenčnem pasu povprečni disperzijski koeficient $D=17\text{ps/(nm.km)}$.

$$\Delta \lambda = \lambda \frac{\Delta f}{f} = c \frac{\Delta f}{f^2} = 0.8 \text{ nm} \quad \Delta t = D \cdot \Delta \lambda \cdot l = 17 \text{ ps/nm.km} \cdot 0.8 \text{ nm} \cdot 7000 \text{ km} = 95 \text{ ns}$$

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 $n_0=1$) $\lambda_0=1550\text{nm}$!

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

$$k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0} \rightarrow d_{\max} = \frac{\lambda_0}{2\sqrt{n_1^2 - n_2^2}} = \frac{1.55\mu\text{m}}{2\sqrt{1.47^2 - 1.46^2}} = \underline{\underline{4.53\mu\text{m}}}$$

2. Polprevodniški DFB laser niha na eni sami spektralni črti širine $\Delta\lambda=0.4\text{pm}$ pri osrednji valovni dolžini $\lambda_0=1550\text{nm}$ (v praznem prostoru, $c=3\text{E}+8\text{m/s}$). Izračunajte osrednjo frekvenco delovanja laserja $f_0=?$, širino frekvenčnega spektra $\Delta f=?$ ter koherentno dolžino svetlobe $l=?$

$$f_0 = \frac{c_0}{\lambda_0} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{1550 \cdot 10^{-9} \text{ m}} = \underline{\underline{193.5 \text{ THz}}} \quad l = \frac{c_0}{\Delta f} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{49.9 \cdot 10^6 \text{ /s}} = \underline{\underline{6.01 \text{ m}}}$$

$$\Delta f = \frac{c_0 \Delta \lambda}{\lambda_0^2} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s} \cdot 0.4 \cdot 10^{-12} \text{ m}}{(1550 \cdot 10^{-9} \text{ m})^2} = \underline{\underline{49.9 \text{ MHz}}}$$

3. Elektrooptični Mach-Zehnder modulator na LiNbO₃ podlagi ima za TE polarizacijo $U_{pi}=7\text{V}$. 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.

$$P_{\text{dBm}} = 10 \log \frac{P}{1 \text{ mW}} = 10 \log \frac{\left(\frac{U_{pi}}{2}\right)^2 \frac{1}{Z_k}}{1 \text{ mW}} = 10 \log \frac{\left(\frac{7\text{V}}{2}\right)^2 \frac{1}{50\Omega}}{10^{-3} \text{ W}} = \underline{\underline{+23.9 \text{ dBm}}}$$

4. InGaAs PIN fotodiode ima kvantni izkoristek $\eta_a=70\%$ in daje pri povprečni vpadni svetlobni moči $P=-35\text{dBm}$ enosmerni foto tok $I=0.233\mu\text{A}$. Površina čipa fotodiode je prekrita z antirefleksnim slojem, temni tok fotodiode pa je pri dani temperaturi zanemarljivo majhen. Določite valovno dolžino vpadne svetlobe! ($c=3\text{E}+8\text{m/s}$, $h=6.624\text{E}-34\text{Js}$, $q_e=-1.6\text{E}-19\text{As}$)

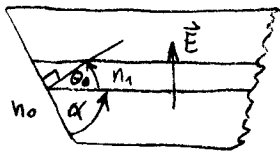
$$P = -35\text{dBm} = \underline{\underline{316 \text{ nW}}} \quad \lambda_0 = \frac{I h c_0}{P \eta_a |q_e|} = \frac{0.233 \cdot 10^{-6} \text{ A} \cdot 6.624 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{316 \cdot 10^{-9} \text{ W} \cdot 0.7 \cdot 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ As}} =$$

$$\frac{P}{I} = \frac{W}{\eta_a |q_e|} = \frac{h f}{\eta_a |q_e|} = \frac{h c_0}{\lambda_0 \eta_a |q_e|} \quad \lambda_0 = \underline{\underline{1308 \text{ nm}}}$$

5. Kolikšen sme biti disperzijski koeficient $D=?$ (ps/nm.km) enorodovnega vlakna pri valovni dolžini $\lambda_0=1550\text{nm}$, če zahtevamo, da se pri prenosni hitrosti $C=2.488\text{Gbit/s}$ impulzi ne razširijo za več kot tretjino dolžine enega bita? Širina spektra svetlobnega izvora vključno z modulacijo znaša $\Delta f=50\text{GHz}$, dolžina zveze pa je $l=50\text{km}$.

$$\Delta t = \frac{1}{3C} = \underline{\underline{134 \text{ ps}}} \quad \Delta \lambda \approx \frac{\lambda_0^2 \Delta f}{c_0} = \underline{\underline{0.4 \text{ nm}}} \quad D = \frac{\Delta t}{\Delta \lambda \cdot l} = \frac{134 \text{ ps}}{0.4 \text{ nm} \cdot 50 \text{ km}} = \underline{\underline{6.69 \frac{\text{ps}}{\text{nm} \cdot \text{km}}}}$$

1. Delovanje DFB laserja motijo neželjeni odboji svetlobe na meji polprevodnik-zrak. Kolikšen kot alfa=? mora zaklepati smer valovoda z izstopno ploskvijo čipa, da bo neželjeni odboj namanjši, če laser niha na enem samem TE rodu? Lomni količnik sredice valovoda znaša $n_1=3.7$, lomni količnik zraka pa je praktično enak enoti.



$$\alpha = \frac{\pi}{2} - \theta_0 = \frac{\pi}{2} - \arctg \frac{n_0}{n_1} = \frac{\pi}{2} - \arctg \frac{1}{3.7} = \frac{\pi}{2} - 0.264 = 1.307 \text{ rad} = \underline{\underline{74.88^\circ}}$$

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 $\lambda=1.3 \mu\text{m}$ (v praznem prostoru) širijo po valovodu največ $m=3$ trije TE in trije TM rodovi!

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = 0.242$$

$$V = m \cdot \pi = k_0 d \cdot NA \rightarrow d = \frac{m \lambda_0}{k_0 NA} = \frac{m \lambda_0}{2 NA} = \frac{3 \cdot 1.3 \mu\text{m}}{2 \cdot 0.242} = \underline{\underline{8.042 \mu\text{m}}}$$

3. Elektrooptični modulator na osnovi LiNbO_3 ima napetost $U_{pi}=6.5\text{V}$. Modulator krmilimo z električnim signalom pravilne amplitude ($U_s=6.5\text{V}$ vrh-vrh), vendar se delovna točka modulatorja odseli za $U=0.5\text{V}$ zaradi spremembe temperature čipa modulatorja. Izračunajte ugasno razmerje (Penica/Pničla) modulatorja v takšnih delovnih razmerah!

$$P = P_{\text{max}} \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos \left(\pi \frac{U}{U_{pi}} \right) \right) \quad U_0 = U_s + U = 7\text{V} \rightarrow P_0 = 0.015 P_{\text{max}} \quad P_1/P_0 = 67.8 = 18.3\text{dB}$$

$$U_1 = 0 + U = 0.5\text{V} \rightarrow P_1 = 0.985 P_{\text{max}}$$

4. Sprejemniški APD-FET modul vsebuje plazovno fotodiodo s faktorjem množenja $M=10$ in kvantnim izkoristkom $\eta_a=0.7$ ter električni ojačevalnik s šumno temperaturo $T=200\text{K}$. Skupna vhodna kapacitivnost fotodiode in ojačevalnika znaša $C_v=2\text{pF}$.

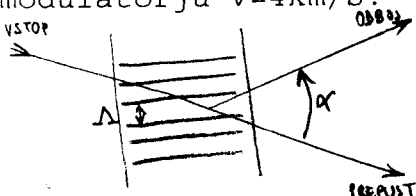
Izračunajte število fotonov $N=?$ z valovno dolžino $\lambda=1.3 \mu\text{m}$ na vходу APD-FET modula, ki dajo enako močen signal kot skupni električni šum in šum multiplikacije! Zaporna napetost na fotodiodi je izbrana tako, da sta oba šuma enako velika.

($h=6.624 \times 10^{-34}\text{Js}$, $q_e=-1.6 \times 10^{-19}\text{As}$, $k_b=1.38 \times 10^{-23}\text{J/K}$, $C=140\text{Mbit/s}$)

$$P_N = P_{N1} + P_{N\text{toplotni}} = 2 P_{N\text{toplotni}} \quad V_N = U_s = \frac{Q}{C} = \frac{N q_e M |q_e|}{C} \rightarrow N = \frac{V_N C}{q_e M |q_e|} = \underline{\underline{37.4}}$$

$$U_N = \sqrt{2} U_{N\text{toplotni}} = \sqrt{\frac{k_b T}{q_e C}} = 20.1 \mu\text{V}$$

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



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

$$\alpha = 2 \arcsin \left(\frac{\lambda f_m}{2v} \right) = 0.012 \text{ rad} = \underline{\underline{0.699^\circ}}$$

1. Določite lastnosti jedra optičnega vlakna (lomni količnik $n_1 = ?$ in polmer jedra $a = ?$), da bo imelo vlakno numerično aperturo $NA = 0.1$ ter postane vlakno mnogorodovno pri valovni dolžini $\lambda = 1.27 \mu\text{m}$ (v praznem prostoru)! Obloga vlakna je izdelana iz čistega kremenovega stekla z lomnim količnikom $n_2 = 1.46$.

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \rightarrow n_1 = \sqrt{NA^2 + n_2^2} = \underline{\underline{1.4634}}$$

$$V = 2.405 = k_0 a NA = \frac{2\pi}{\lambda_0} a NA \rightarrow a = \frac{2.405 \lambda_0}{2\pi NA} = \underline{\underline{4.861 \mu\text{m}}}$$

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 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ (v praznem prostoru) v krožno polarizirano svetlobo.

$$\Delta\varphi = \frac{\pi}{2} = k_{TM} d - k_{TE} d = n_{TM} k_0 d - n_{TE} k_0 d = (n_{TM} - n_{TE}) \frac{2\pi}{\lambda_0} d$$

$$d = \frac{\lambda_0}{4(n_{TM} - n_{TE})} = \underline{\underline{1.055 \mu\text{m}}}$$

3. Polprevodniški laser (FP rezonator) za valovno dolžino $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$ niha na več vzdolžnih TE rodovih. Pri kateri frekvenci $f = ?$ dobimo največji modulacijski šum zaradi preskakovanja laserja med rodovi, če dolžina laserskega čipa $l = 1 \text{ mm}$ in znaša povprečni lomni količnik valovoda $n = 3.7$? ($c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$)

$$f_{\text{opt}} = m \frac{c}{2l} = m \frac{c_0}{2ln} \rightarrow f = \frac{c_0}{2ln} = \underline{\underline{40.54 \text{ GHz}}}$$

4. Določite skupni faktor množenja elektronov $M = ?$ fotopomnoževalke, ki je opremljena s fotokatodo s kvantnim izkoristkom $\eta = 0.2$! Na fotokatodo vpada $N = 1 \times 10^6$ (miljon) fotonov na sekundo rdeče svetlobe HeNe laserja ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$). Anoda fotopomnoževalke vleče električni tok $I_a = 1 \text{ mA}$. ($h = 6.624 \times 10^{-34} \text{ Js}$, $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$, $q_e = -1.6 \times 10^{-19} \text{ As}$)

$$I_k = \eta N |q_e|$$

$$M = \frac{I_a}{I_k} = \frac{I_a}{\eta N |q_e|} = \underline{\underline{3.125 \cdot 10^{10}}}$$

5. Kolikšen je domet zveze po vlaknu s koeficientom disperzije $D = 17 \text{ ps/(nm.km)}$ z zmogljivostjo $C = 622 \text{ Mbit/s}$? Oddajnik uporablja mnogorodovni FP 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. ($c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$)

$$\left| \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \right| = \left| \frac{\Delta f}{f} \right| \rightarrow \Delta\lambda = \frac{\Delta f c_0}{f^2} = \underline{\underline{2.391 \text{ nm}}}$$

$$l = \underline{\underline{13.18 \text{ km}}}$$

$$\Delta t = \frac{1}{3C} = D \Delta\lambda l \rightarrow l = \frac{1}{3CD \Delta\lambda} = \frac{1}{3 \cdot 622 \cdot 10^6 \cdot 17 \cdot 10^{-12} \text{ s/(nm.km)} \cdot 2.391 \text{ nm}}$$

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!

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

$$\Gamma_{TE} = \frac{\cos^2 \theta - \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}}{\cos^2 \theta + \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}} = \frac{1-n^2}{1+n^2} = -0.385 \quad a = 2N \cdot 10 \log_{10} (1 - |\Gamma_{TE}|^2) = -41.7 \text{ dB}$$

2. Optično vlakno navijemo na polmer $r=1\text{cm}$, da postane jedro vlakna zaradi mehanske napetosti dvolomno. Pri tem en ovoj predstavlja $\lambda/4$ ploščico pri valovni dolžini $\lambda=1550\text{nm}$. Izračunajte razliko med lomnima količnikoma za TE in TM polarizacijo v zakrivljenem delu vlakna $\Delta n=?$, če znaša povprečni lomni količnik jedra $n=1.47$!

$$\Delta \varphi = \pi/2 = \Delta k l = \Delta n k_0 l$$

$$k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0} \quad l = 2\pi r \quad \Delta n = \frac{\pi}{2k_0 l} = \frac{\lambda_0}{8\pi r} = 6.17 \cdot 10^{-6}$$

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 odprtna enakomerno osvetljena z osnovnim TE rodod laserskega resonatorja. ($c=3\text{E}+8\text{m/s}$, $Z_0=377\Omega$)

$$|S| = \frac{P}{A} = \frac{P}{w \cdot h} = 6.67 \cdot 10^8 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

$$|S| = \frac{1}{2} |\vec{E} \times \vec{H}^*| = \frac{|\vec{E}|^2}{2Z_0} \rightarrow |\vec{E}| = \sqrt{2Z_0 |S|} = 7.09 \cdot 10^5 \text{ V/m}$$

4. PIN-FET sprejemnik ima občutljivost $P_{\min}=-40\text{dBm}$ pri zmogljivosti zveze $C=155\text{Mbit/s}$. Izračunajte občutljivost izboljšanega sprejemnika $P_{\min}'=?$, kjer prvotno PIN fotodiodo s kapacitivnostjo $C_d=2\text{pF}$ in kvantnim izkoristkom $\eta_a=0.6$ nadomestimo z boljšo fotodiodo s kapacitivnostjo $C_d'=1\text{pF}$ in kvantnim izkoristkom $\eta_a'=0.8$! Električni ojačevalnik ostane v obeh slučajah enak z isto kapacitivnostjo $C_0=1\text{pF}$ in šumno temperaturo $T=200\text{K}$. ($h=6.624\text{E}-34\text{Js}$, $k_B=1.38\text{E}-23\text{J/K}$, $Q_e=-1.6\text{E}-19\text{As}$)

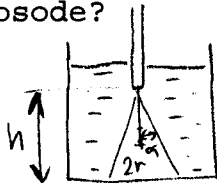
$$U_s = \frac{Q}{C_d + C_0} = \frac{\eta N_f |Q_e|}{C_d + C_0} \quad \left\{ \begin{array}{l} U_s = \frac{\eta N_f |Q_e| \sqrt{I_a}}{\sqrt{k_B T (C_d + C_0)}} = \alpha \frac{\eta N_f}{\sqrt{C_d + C_0}} = \alpha' \frac{\eta P}{\sqrt{C_d + C_0}} \\ U_{\text{neff}} = \sqrt{B k_B T R} \approx \sqrt{\frac{k_B T}{2\pi (C_d + C_0)}} \end{array} \right.$$

$$P_{\min}' = P_{\min} \left(\frac{1}{\eta'} \right) \sqrt{\frac{C_d' + C_0}{C_d + C_0}} = 0.612 P_{\min} = 61.2 \text{ nW} = -42.1 \text{ dBm}$$

5. Visokozmogljivo $C=40\text{Gbit/s}$ optično zvezo omejuje polarizacijska disperzija vlakna s povprečnim koeficientom $D_{\text{pmd}}=0.2\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$. Določite razdaljo med regeneratorji 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!

$$\Delta t = D_{\text{pmd}} \sqrt{l} = \frac{1}{3} \left(\frac{T}{3} \right) = \frac{1}{9C} \rightarrow l = \frac{1}{(9C D_{\text{pmd}})^2} = 193 \text{ km}$$

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 $h=10\text{cm}$ nad dnom posode?



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

lom v tekočino: $\sin \alpha = \frac{\sin \alpha'}{n} = \frac{NA}{n} = \frac{0.18}{1.3} = 0.138$

$2r = 2h \tan \alpha = 2 \cdot 10 \text{ cm} \cdot \frac{0.138}{\sqrt{1-0.138^2}} = 2.8 \text{ cm}$

2. Optični signal se širi po $l=6\text{cm}$ 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 $\Delta t=?$, ki jo vnaša takšen valovod pri osrednji valovni dolžini svetlobe $\lambda=1.55\mu\text{m}$ v praznem prostoru!

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

$\Delta t = t'' - t' = \frac{l}{c_0} (n'' - n') = \frac{6 \cdot 10^{-2} \text{ m}}{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}} (2.2 - 2.05) = 3 \cdot 10^{-11} \text{ s}$

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

$= 30 \text{ ps}$

3. Pri sobni temperaturi $T=25^\circ\text{C}$ 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 $T'=65^\circ\text{C}$ pri nespremenjenem krmilnem toku. Pri kateri temperaturi laserja $T''=?$ dobimo z istim tokom izhodno moč $P''=5\text{mW}$?

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

$P = 4 \text{ mW} = \alpha - \beta \cdot 25^\circ\text{C}$
 $P' = 0 \text{ mW} = \alpha - \beta \cdot 65^\circ\text{C}$

$\beta = 0.1 \text{ mW}/^\circ\text{C}$
 $\alpha = 6.5 \text{ mW}$

$\rightarrow T'' = 15^\circ\text{C}$

$I_p(T) \approx aT + b$

$P \approx k(I - aT - b) = kI - b - kaT = \alpha - \beta T$

$P'' = 5 \text{ mW} = 6.5 \text{ mW} - 0.1 \text{ mW}/^\circ\text{C} \cdot T''$

4. Optični PIN-FET sprejemniški modul vsebuje električni ojačevalnik s šumno temperaturo $T=300\text{K}$. Skupna kapacitivnost fotodiode in vhoda ojačevalnika znaša $C=2\text{pF}$. Določite število fotonov $N=?$, potrebnih za prenos logične enice pri valovni dolžini $\lambda=1.55\mu\text{m}$, če zahtevamo razmerje $P_{\text{enice}}/P_{\text{šuma}}=30$ na električnem izhodu sprejemnika in znaša kvantni izkoristek PIN fotodiode $\eta=0.7$. ($h=6.624\text{E}-34\text{Js}$, $k_B=1.38\text{E}-23\text{J/K}$, $Q_e=-1.6\text{E}-19\text{As}$, $c=3\text{E}+8\text{m/s}$)

$U_{\text{šuma}} \approx \sqrt{\frac{k_B T}{2qC}} = 18 \mu\text{V}$; $U_{\text{enice}} = U_{\text{šuma}} \sqrt{\frac{P_{\text{enice}}}{P_{\text{šuma}}}} = 93 \mu\text{V}$

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

5. Erbijev vlakenski optični ojačevalnik črpamo s svetlobo valovne dolžine $\lambda=980\text{nm}$ do popolne inverzne naseljenosti energijskih nivojev. Brez vhodnega signala daje ojačevalnik svetlobno moč spontanega sevanja $P=15\text{mW}$ v pasu okoli $\lambda=1550\text{nm}$. Izračunajte število erbijevih ionov $N=?$ v ojačevalnem vlaknu, če spontano sevanje preneha $t=10\text{ms}$ po izklopu črpalke! ($c=3\text{E}+8\text{m/s}$, $h=6.624\text{E}-34\text{Js}$)

$W = P \cdot t = N \cdot h \cdot f = N \cdot \frac{hc_0}{\lambda} \rightarrow N = \frac{P \cdot t \cdot \lambda}{h c_0} = \frac{15 \cdot 10^{-3} \text{ W} \cdot 10^{-2} \text{ s} \cdot 1550 \cdot 10^{-9} \text{ m}}{6.624 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}} = 1.17 \cdot 10^{15}$

1. Svetlobni žarek vпада iz praznega prostora na površino snovi z lomnim količnikom $n=1.6$ pod Brewster-jevim kotom. Kolikšna je tedaj odbojnost za TE polarizacijo G_{TE} ? Kolikšna je moč odbitega žarka P_o ? od površine snovi, če je vpadni žarek nepolariziran in ima moč $P_v=5mW$?

$$\Theta_B = \arctan n = 1.012 \text{ rad} \quad \Gamma_{TM} = 0 \quad P_o = P_v \frac{|\Gamma_{TE}|^2 + |\Gamma_{TM}|^2}{2} = 0.48 \text{ mW}$$

$$\Gamma_{TE} = \frac{\cos \Theta - \sqrt{n^2 - \sin^2 \Theta}}{\cos \Theta + \sqrt{n^2 - \sin^2 \Theta}} = -0.438$$

2. Izračunajte električno poljsko jakost E ? v jedru enorodovnega vlakna s polmerom $a=5\mu m$ in lomnim količnikom $n_1=1.46$. Po vlaknu prenašamo svetlobno moč $P=10mW$ z valovno dolžino $\lambda=1.55\mu m$. Pri računu upoštevamo, da je pretok moči skoraj enakomerno razporejen po preseku jedra vlakna. ($c=3E+8m/s$, $Z_o=377\Omega$)

$$S = \frac{P}{\pi a^2} = 127 \text{ MW/m}^2 \quad E = \sqrt{2ZS} = 256 \text{ kV/m}$$

$$Z = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} = \sqrt{\frac{\mu_o}{\epsilon_o \epsilon_r}} = \frac{Z_o}{n_1} = 258 \Omega$$

3. GaAlAs polprevodniški laser za osrednjo valovno dolžino $\lambda=850nm$ vsebuje Fabry-Perot-ov rezonator, kjer so zrcala kar stranice čipa. Dolžina laserskega čipa znaša $l=0.4mm$, srednji lomni količnik valovoda je $n=3.7$. Izračunajte širino spektra laserske svetlobe $\Delta\lambda$, če laser istočasno niha na $N=10$ vzdolžnih rodovih! ($c=3E+8m/s$)

$$\Delta f = N \frac{c_o}{2l n} = 1.014 \text{ THz}$$

$$\Delta \lambda = \Delta f \frac{\lambda^2}{c_o} = 2.44 \text{ nm}$$

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

4. PIN-FET modul vsebuje fotodiodo s kvantnim izkoristkom $\eta=70\%$ pri valovni dolžini $\lambda_{d1}=1.3\mu m$. Pri tej valovni dolžini znaša občutljivost sprejemnika $P_1=-35dBm$ za dovolj nizko pogostnost napak BER. Kolikšna je občutljivost sprejemnika P_2 ? na valovni dolžini $\lambda_{d2}=1.55\mu m$, kjer kvantni izkoristek fotodiode naraste na $\eta_2=80\%$? Pri računu upoštevamo, da večino šuma povzroča električni ojačevalnik, ki sledi fotodiodi. ($h=6.624E-34Js$, $q_e=-1.6E-19As$)

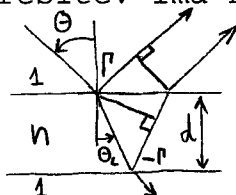
$$\left. \begin{aligned} P_1 &= \frac{hc_o}{\lambda_1 \eta_1} \frac{dN_e}{dt} \\ P_2 &= \frac{hc_o}{\lambda_2 \eta_2} \frac{dN_e}{dt} \end{aligned} \right\} \begin{aligned} P_1 &= -35dBm = 316nW \\ P_2 &= \frac{\lambda_1 \eta_1}{\lambda_2 \eta_2} P_1 = 232nW = -36.34dBm \end{aligned}$$

5. Podmorski prekooceanski kabel sestavlja $N=100$ odsekov dolžine $l=50km$. Odseki vsebujejo enorodovno optično vlakno s slabljenjem $a=0.22dB/km$ pri valovni dolžini $\lambda=1.55\mu m$. Vsakemu odseku vlakna sledi erbijev laserski ojačevalnik ($F=3dB$), 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 $\Delta\lambda=30nm$! ($c=3E+8m/s$, $h=6.624E-34Js$)

$$G = a l = 11dB = 12.6 \quad F=3dB \rightarrow \mu=1 \quad P = 2N \mu (G-1) h f \Delta f = 1.11mW$$

$$f = \frac{c_o}{\lambda} = 193.5THz \quad \Delta f = \Delta \lambda \frac{f}{\lambda} = 3.75THz$$

1. Nepolariziran svetlobni žarek z valovno dolžino $\lambda = 0.6 \mu\text{m}$ vpadna iz praznega prostora na površino $d = 1 \mu\text{m}$ debele prozorne opne z lomnim količnikom $n = 1.5$. Pri katerem vpadnem kotu $\theta = ?$ doseže moč odbitega žarka najnižjo vrednost? Koliko rešitev ima naloga?



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

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

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

$$m_{\min} = \text{int}(3.727) + 1 = 4$$

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

$$\theta = \arcsin \left(n \sqrt{1 - \left(\frac{m\lambda}{2dn} \right)^2} \right) = 64.16^\circ; 0^\circ$$

2 rešitvi: $m = 4, 5$

2. Izračunajte sklopni izkoristek $\eta = ?$ 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 $NA_{\max} = 0.2$. Vlakno ima parabolni lomni lik. Svetleča dioda sveti kot neusmerjeno svetilo ($\lambda = 1.3 \mu\text{m}$) s premerom, ki ustreza premeru jedra vlakna.

$$\Delta = \Delta_{\max} \left(1 - \left(\frac{r}{r_o} \right)^2 \right) \quad \eta(r) = \frac{\Omega}{4\pi} \approx \frac{NA^2}{4}$$

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

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

$$\eta_{\text{sk}} = \frac{1}{\pi r_o^2} \int_0^{r_o} \int_0^{2\pi} \eta(r) r dr d\phi = \frac{2}{r_o^2} \int_0^{r_o} \frac{NA_{\max}^2}{4} \left(1 - \frac{r^2}{r_o^2} \right) r dr = \frac{NA_{\max}^2}{2r_o^2} \left(\frac{r_o^2}{2} - \frac{r_o^2}{4} \right) = \frac{NA_{\max}^2}{8} = 0.5\%$$

3. Mach-Zehnder-jev modulator na osnovi LiNbO₃ ima pri valovni dolžini $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ občutljivosti $U_{\text{PI TE}} = 6 \text{ V}$ in $U_{\text{PI TM}} = 17 \text{ V}$. Pri kateri napetosti na krmilni elektrodi $U = ?$ upade izhodna svetlobna moč na polovico $P_i = P_{\text{imax}}/2$, če uporabimo kot izvor svetlobe nepolarizirano ojačeno spontano sevanje ASE erbijskega optičnega ojačevalnika?

$$P_{\text{TEi}} = P_{\text{TEimax}} \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos \left(\pi \frac{U}{U_{\text{PI TE}}} \right) \right); P_{\text{TMi}} = P_{\text{TMimax}} = \frac{1}{2} P_{\text{imax}}$$

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

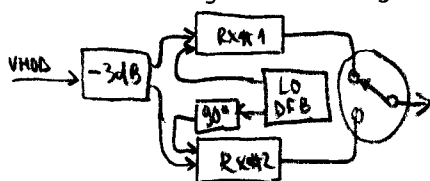
$$\cos \alpha + \cos \beta = 2 \cos \frac{\alpha + \beta}{2} \cos \frac{\alpha - \beta}{2}$$

$$\frac{U}{U_{\text{PI TE}}} + \frac{U}{U_{\text{PI TM}}} = 1 \rightarrow U = \frac{1}{\frac{1}{U_{\text{PI TE}}} + \frac{1}{U_{\text{PI TM}}}} = 4.435 \text{ V}$$

Prva rešitev ($U = \min$)

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

4. Delovanje koherentnega optičnega sprejemnika moti neskladnost polarizacije med vhodnim signalom in signalom lokalnega oscilatorja (DFB laserja). Koliko znaša izguba občutljivosti sprejemnika (v decibelih) 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.



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

$$\text{skladna polarizacija: } \alpha = 0 \rightarrow a_1 = 3 \text{ dB}$$

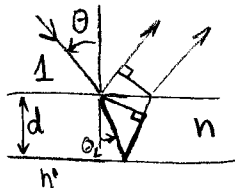
$$\text{poševna polarizacija: } \alpha = \frac{\pi}{4} \rightarrow a_2 = 6 \text{ dB}$$

5. Na koncu podmorskega prekooceanskega kabla z $N = 150$ odseki dolžine $l = 50 \text{ km}$ izmerimo šumno moč $P = +0 \text{ dBm}$. Kolikšna je pasovna širina Δf ? Er³⁺ laserskih ojačevalnikov z idealnim šumnim številom $F = 3 \text{ dB}$ na osrednji valovni dolžini $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$? Ojačevalniki natančno nadomestijo slabljenje kabla $a = 0.2 \text{ dB/km}$.

$$G = a \cdot l = 0.2 \text{ dB/km} \cdot 50 \text{ km} = 10 \text{ dB} = 10; P_{\text{in}} = 2 \text{ mW}$$

$$\Delta f = \frac{P \lambda^3}{2 N G h c^3} = 20.8 \text{ nm}$$

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 $\theta=30^\circ$ iz praznega prostora na površino stekla.

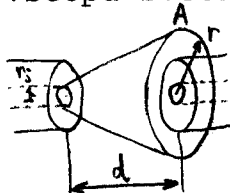


$$n = \sqrt{n'} = 1.265 \quad d = \frac{\lambda}{4n \cos \theta_L} = \frac{\lambda}{4n \sqrt{1 - \left(\frac{\sin \theta}{n}\right)^2}}$$

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

$$\sin \theta_L = \frac{\sin \theta}{n} \quad d = \frac{\lambda}{4\sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}} = 108 \text{ nm}$$

2. Določite potrebni vzdolžni razmik $d=?$ med koncema enakih mnogorodovnih vlaken 50/125 μm 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 $NA=0.2$.



$$r \approx r_j + d NA$$

$$a = 10 \log \frac{A}{A_j} = 20 \log \frac{r}{r_j}$$

$$a = 20 \log \left(1 + \frac{d NA}{r_j}\right)$$

$$d = \frac{r_j}{NA} \left(10^{\frac{a}{20}} - 1\right) = \frac{25 \mu\text{m}}{0.2} \left(10^{\frac{15}{20}} - 1\right)$$

$$d = 578 \mu\text{m}$$

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

$$S = \frac{|E|^2}{2Z_0} \quad P_{\text{max}} = \frac{|E_{\text{max}}|^2 wh}{2Z_0} = \frac{(10^6 \text{ V/m})^2 \cdot 6 \cdot 10^{-6} \text{ m} \cdot 2 \cdot 10^{-6} \text{ m}}{2 \cdot 377 \Omega} = 15.9 \text{ mW}$$

$$P = SA = Swh$$

4. Izračunajte domet reflektometra OTDR v smislu slabljenja merjenja $a=?$ (v decibelih)! 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 omogočata zaznavanje impulzov z $N=1000$ fotonov. Impulzi prepotujejo merjenec v obeh smereh in se na koncu merjenja odbijejo na meji steklo ($n=1.46$)/zrak. ($h=6.624\text{E}-34\text{Js}$)

$$N_0 = \frac{Pt}{hf} = \frac{Pt\lambda}{hc_0} = 3.271 \cdot 10^{10}$$

$$2a = 10 \log \left(\frac{N_0}{N_s} |r|^2\right) \quad a = 5 \log \left(\frac{N_0}{N_s} |r|^2\right)$$

$$|r| = \frac{n-1}{n+1} = 0.187$$

$$a = 30.3 \text{ dB}$$

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 $n=3.7$. ($c=3\text{E}+8\text{m/s}$)

$$\Delta f = N \frac{c_0}{2l_r n} = 81 \text{ GHz} ; \Delta \lambda = \Delta f \frac{\lambda^2}{c_0} = 4.57 \text{ nm} ; \Delta t = \frac{1}{3C} = 536 \text{ ps} ; D = \frac{\Delta t}{l \Delta \lambda} = 1.38 \frac{\text{ps}}{\text{nm.km}}$$

1. Enorodovno svetlobno vlakno s premerom jedra $2a=10\mu\text{m}$ ($n_1=1.47$) se obnaša kot četrtovalovna ploščica za valovno dolžino $\lambda=1550\text{nm}$, ko vlakno navijemo v krog s polmerom $r=9\text{mm}$. Izračunajte razliko lomnega količnika $\Delta n=?$ za obe polarizaciji, ki jo povzroča mehanska napetost v vlaknu!

$$\varphi_{TE} = k_{TE} l = n_{TE} k_0 l \quad l = 2\pi r \quad \frac{\pi}{2} = \Delta n \frac{2\pi}{\lambda_0} 2\pi r$$

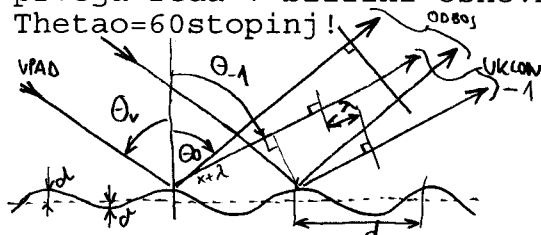
$$\varphi_{TM} = k_{TM} l = n_{TM} k_0 l$$

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

$$\Delta n = \frac{\lambda_0}{4} \cdot \frac{1}{2\pi r} = \frac{1.55 \cdot 10^{-6} \text{m}}{4 \cdot 2\pi \cdot 9 \cdot 10^{-3} \text{m}} = \underline{\underline{6.853 \cdot 10^{-6}}}$$

2. Rdeči žarek HeNe laserja z valovno dolžino $\lambda=632.8\text{nm}$ vpada pod kotom $\Theta_0=60^\circ$ na valovito površino uklonske mrežice s periodo $d=5\mu\text{m}$ in amplitudo $\delta=\pm 0.2\mu\text{m}$.

Izračunajte smeri $\Theta_{+1}=?$ in $\Theta_{-1}=?$ uklonjenih žarkov prvega reda v bližini osnovnega odbitega žarka v smeri $\Theta_0=60^\circ$!



$$\begin{aligned} x &= d \sin \Theta_0 = d \sin \Theta_0 \\ x + \lambda &= d \sin \Theta_{-1} \quad \Theta_{-1} = \arcsin\left(\sin \Theta_0 + \frac{\lambda}{d}\right) = \underline{\underline{83.02^\circ}} \\ x - \lambda &= d \sin \Theta_{+1} \quad \Theta_{+1} = \arcsin\left(\sin \Theta_0 - \frac{\lambda}{d}\right) = \underline{\underline{47.69^\circ}} \end{aligned}$$

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

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

$$U_{\pi TE}' = U_{\pi TE} \frac{\lambda_0'}{\lambda_0} = \underline{\underline{5.03\text{V}}}$$

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

$$U_{\pi TM}' = U_{\pi TM} \frac{\lambda_0'}{\lambda_0} = \underline{\underline{13.42\text{V}}}$$

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

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 $\lambda=632.8\text{nm}$ kvantni izkoristek $\eta=0.2$, če znaša končni anodni tok $I_a=1\text{mA}$. ($h=6.624\text{E}-34\text{Js}$, $q_e=-1.6\text{E}-19\text{As}$, $c=3\text{E}+8\text{m/s}$)

$$I_a = I_k M^N \quad P = \frac{hc_0}{\lambda \eta} \frac{I_a}{|q_e| M^N} = \underline{\underline{9.36\text{nW}}}$$

$$I_k = |q_e| \frac{dN_e}{dt}$$

$$P = hf \frac{dN_e}{dt} = h \frac{c_0}{\lambda} \frac{1}{\eta} \frac{dN_e}{dt}$$

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! ($\delta t_{\text{max}}=T_{\text{bit}}/3$)

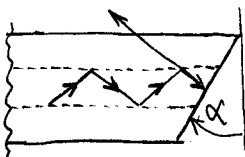
$$\delta t = \frac{T}{3} = \frac{1}{3C} = D \Delta\lambda l; \Delta\lambda = \delta f \frac{\lambda^2}{c_0} = \underline{\underline{0.4\text{nm}}}; l = \frac{1}{3C D \Delta\lambda} = \underline{\underline{467\text{km}}}$$

1. Svetlobno vlakno ima jedro premera $2r=50\mu\text{m}$ z lomnim količnikom $n_1=1.47$ ter oblogo z lomnim količnikom $n_2=1.46$. Izračunajte slabljenje odbitega vala $a=?$ (v decibelih!) na koncu vlakna, ki je odrezano pod pravim kotom ter potopljeno v tekočino z lomnim količnikom $n'=1.33$ pri valovni dolžini $\lambda=850\text{nm}$!

$$\Theta_q=0 \Rightarrow |\Gamma_{TE}| = |\Gamma_{TM}| = \left| \frac{n_1 - n'}{n_1 + n'} \right| = \frac{0.14}{2.80} = 0.05$$

$$a = 20 \log_{10} |\Gamma| = \underline{\underline{-26\text{dB}}}$$

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 $\alpha=?$ glede na pravokotnico morajo biti brušene spojne ploskve konektorjev, da preprečimo neželeni odboj svetlobe nazaj v jedro vlakna? $n_{\text{jedra}} \approx 1.5$



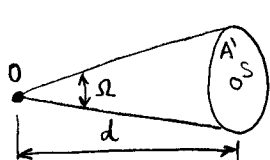
$$NA = \sin \alpha_0 = n_{\text{jedra}} \sin \alpha$$

$$\alpha = \arcsin \frac{NA}{n_{\text{jedra}}} = \arcsin \frac{0.1}{1.5} = \underline{\underline{3.82^\circ}}$$

3. HeNe laser vsebuje kapilaro dolžine $l=150\text{mm}$ in dve selektivni zrcali za valovno dolžino $\lambda=632.8\text{nm}$ z odbojnostima $G_{a1}=0.98$ in $G_{a2}=0.995$. Določite ojačenje plinske zmesi $dG/dz=?$ na enoto dolžine (v dB/m), ko laser ravno začne nihati!

$$\frac{dG}{dz} = \frac{1}{2l} (-20 \log_{10} \Gamma_1 \Gamma_2) = \frac{1}{0.3\text{m}} (-20 \log_{10} (0.98 \cdot 0.995)) = \underline{\underline{0.43\text{dB/m}}}$$

4. Daljinec za televizor vsebuje svetlečo diodo, ki na valovni dolžini $\lambda=900\text{nm}$ sveti z močjo $P=5\text{mW}$ v prostorskem kotu $\Omega=1\text{sr}$. Izračunajte število fotonov $N=?$, ki v času trajanja enega bita $T=1\text{ms}$ padejo na sprejemno fotodiodo s površino $A=1\text{mm}^2$ na oddaljenosti $d=10\text{m}$! ($h=6.624\text{E}-34\text{Js}$, $q_e=-1.6\text{E}-19\text{As}$)



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

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

$$W = hf = hc/\lambda$$

$$N = \frac{P_s}{W} T = \frac{PA}{\Omega d^2} \frac{\lambda}{hc} T$$

$$\underline{\underline{N = 266450 \text{ fotonov}}}$$

5. Prekoceanski kabel uporablja valovnodolžinski multipleks (WDM) in erbijeve svetlobne ojačevalnike. V prvem pasu valovnih dolžin $\lambda_{a1}=1530\text{nm}-1540\text{nm}$ uporabljamo $C_1=2.5\text{Gbit/s}$ kanale s kanalskim razmakom $\Delta f_1=50\text{GHz}$, v drugem pasu $\lambda_{a2}=1545\text{nm}-1565\text{nm}$ pa $C_2=10\text{Gbit/s}$ kanale s kanalskim razmakom $\Delta f_2=100\text{GHz}$. Kolikšna je celotna zmogljivost $C=?$ kabla z $N=8$ svetlobnimi vlakni? ($c=3\text{E}+8\text{m/s}$)

$$N_1 = \frac{\Delta \lambda_1 \frac{c}{\lambda_1}}{\Delta f_1} = \frac{1243\text{GHz}}{50\text{GHz}} = 25.46 \Rightarrow \underline{\underline{25 \text{ kanalov}}}$$

$$N_2 = \frac{\Delta \lambda_2 \frac{c}{\lambda_2}}{\Delta f_2} = \frac{2481\text{GHz}}{100\text{GHz}} = 24.81 \Rightarrow \underline{\underline{24 \text{ kanalov}}}$$

$$C = N (C_1 N_1 + C_2 N_2) =$$

$$= 8 (62.5\text{Gbit/s} + 240\text{Gbit/s}) = \underline{\underline{2.42 \text{ Tbit/s}}}$$

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 nanesene plasti $d=?$, če znaša notranji polmer kremenove cevi $r_1=5\text{mm}$, zunanji polmer $r_2=15\text{mm}$ in mora imeti končni izdelek zunanji premer $2r=125\mu\text{m}$, numerično aperturo $NA=0.1$ ter mejno valovno dolžino $\lambda=1.25\mu\text{m}$ za enorodovno delovanje!

$$V=2.405; k=\frac{2\pi}{\lambda}; \quad \frac{A_{\text{jedra}}}{A_{\text{obloge}}} = \frac{\pi a^2}{\pi(r^2-a^2)} = \frac{\pi[r_1^2-(r_1-d)^2]}{\pi(r_2^2-r_1^2)}; (r_1-d)^2 = r_1^2 - \frac{a^2(r_2^2-r_1^2)}{r^2-a^2}$$

$$V = k a NA$$

$$a = \frac{V}{k NA} = \frac{2.405 \lambda}{2\pi NA} = 4.485 \mu\text{m}; d = r_1 - \sqrt{r_1^2 - \frac{a^2(r_2^2-r_1^2)}{r^2-a^2}} = 119 \mu\text{m}$$

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 čimmanjše in ni neželjenih odbojev svetlobe. Obe vlakni imata zunanji premer obloge $d_o=125\mu\text{m}$ in imata pri brezhibnem zvaru točno poravnane osi.

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

3. Svetlobni oddajnik vsebuje neposredno moduliran laser in doseže ugasno razmerje $a=10\text{dB}$. Izračunajte, za koliko km $\Delta l=?$ 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 0.35dB/km pri valovni dolžini $\lambda=1.3\mu\text{m}$.

$$a = 10\text{dB} = 10; \quad \frac{(P_1 - 0)}{(P_1 - P_0)} = \frac{P_1}{P_1 - (P_1/a)} = \frac{a}{a-1} = \frac{10}{9} = 1.11 = 0.435\text{dB}$$

$$P_0 = P_1/a$$

$$\Delta l = \frac{0.435\text{dB}}{0.35\text{dB/km}} = 1.295\text{km}$$

4. Sprejemniški APD-FET modul vsebuje plazovno fotodiodo s kvantnim izkoristkom $\eta_a=0.7$ 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 $N=1000$ fotoni pri bitni hitosti $C=155\text{Mbit/s}$! ($h=6.624\text{E-34Js}$, $c=3\text{E+8m/s}$, $\lambda=1.3\mu\text{m}$, $Q_e=-1.6\text{E-19As}$)

$$Q = |Q_e| N_f M; I = \frac{Q}{T} = QC; U = I R_t$$

$$U = |Q_e| N_f M C R_t = 3.47\text{mV}$$

5. Laserski ojačevalnik z erbijevim vlaknom doseže izhodno moč $P=+17\text{dBm}$ pri valovni dolžini $\lambda=1550\text{nm}$. Izračunajte potrebno moč $P'=?$ črpalnega laserja na valovni dolžini $\lambda'=980\text{nm}$, če ojačevalno vlakno izkorišča $\eta_a=85\%$ fotonov črpalke in znašajo dodatne izgube v izolatorju na izhodu ojačevalnika $a=0.3\text{dB}$!

$$P = +17\text{dBm} = 50.1\text{mW}; a = 0.3\text{dB} = 1.072$$

$$P' = P a \frac{\lambda}{\lambda'} \left(\frac{1}{\eta}\right) = 99.9\text{mW} = +20\text{dBm}$$

1. Rdeč žarek nepolariziranega HeNe laserja z valovno dolžino $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ vпада pod kotom $\theta = 15^\circ$ iz praznega prostora na stekleno ploščico z lomnim količnikom $n = 1.48$. Izračunajte, v kolikšnem območju $\Delta \alpha$ (v decibelih) se lahko spreminja jakost odbitega žarka, če se polarizacija laserja naključno spreminja, njegova povprečna izhodna moč pa ostane konstantna!

$$\Gamma_{TE} = \frac{\cos \theta - \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}}{\cos \theta + \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}} = -0.203$$

$$\Delta \alpha_{dB} = 20 \log_{10} \left| \frac{\Gamma_{TE}}{\Gamma_{TM}} \right| = 0.827 \text{ dB}$$

$$\Gamma_{TM} = \frac{n^2 \cos \theta - \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}}{n^2 \cos \theta + \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}} = 0.184$$

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! ($c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$)

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \rightarrow n_1 = \sqrt{n_2^2 + NA^2} = 1.4612$$

$$V = \pi = k d NA$$

$$\rightarrow NA = \frac{\pi}{k d} = \frac{\pi c_0}{\omega d} = \frac{c_0}{2 f d} = 0.06$$

3. Polprevodniški DFB laser za nazivno valovno dolžino $\lambda = 1550 \text{ nm}$ 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 $l = 1 \text{ m}$ od laserja! ($c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$, $n_{\text{jedra}} = 1.46$)

$$\Delta f = \frac{c_0}{2 l n} = 102.7 \text{ MHz} ; \Delta \lambda = \Delta f \frac{\lambda_0^2}{c_0} = 8.23 \cdot 10^{-13} \text{ m} = 0.823 \text{ pm}$$

4. Sprejemniški APD-FET modul za zvezo zmogljivosti $C = 622 \text{ Mbit/s}$ na valovni dolžini $\lambda = 1300 \text{ nm}$ vsebuje plazovno fotodiodo s kvantnim izkoristkom $\eta = 75\%$ in optimalnim faktorjem multiplikacije $M = 15$. Izračunajte napetost Uvrhvrh=? na izhodu transimpedančnega ojačevalnika z $R = 800 \Omega$ pri povprečni moči vhodnega svetlobnega signala $P_0 = -35 \text{ dBm}$ z uravnoteženim razmerjem enic in ničel! ($c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$, $h = 6.624 \times 10^{-34} \text{ Js}$) ($Q_e = -1.6 \cdot 10^{-19} \text{ As}$)

$$I_s = 2 P_0 \frac{|Q_e| \lambda}{h c_0} \eta M \quad P_0 = -35 \text{ dBm} = 316 \text{ nW}$$

$$U_s = I_s R_t = 2 P_0 \frac{|Q_e| \lambda}{h c_0} \eta M R_t = 5.96 \text{ mV}$$

5. Svetlobno zvezo sestavimo iz vlaken v kabljih, ki so že vkopani. V prvem odseku zveze dolžine $l_1 = 30 \text{ km}$ imamo na razpolago le standardno vlakno G.652 z disperzijskim koeficientom $D_1 = +17 \text{ ps/(nm.km)}$ in slabljenjem $a_1 = 0.22 \text{ dB/km}$. V drugem odseku zveze dolžine $l_2 = 25 \text{ km}$ imamo na razpolago NZDSF vlakno z disperzijskim koeficientom $D_2 = +4 \text{ ps/(nm.km)}$ in slabljenjem $a_2 = 0.25 \text{ dB/km}$. Izračunajte potrebno dolžino l_k kompenzacijskega vlakna z disperzijskim koeficientom $D_k = -80 \text{ ps/(nm.km)}$ in slabljenjem $a_k = 0.6 \text{ dB/km}$! Kolikšno je celotno slabljenje a (dB) disperzijsko kompenzirane zveze?

$$D_1 l_1 + D_2 l_2 + D_k l_k = 0$$

$$a = a_1 l_1 + a_2 l_2 + a_k l_k = 17.4 \text{ dB}$$

$$\rightarrow l_k = \frac{D_1 l_1 + D_2 l_2}{-D_k} = 7.625 \text{ km}$$

1. Žarek polariziranega HeNe laserja moči $P_v = 2\text{mW}$ z valovno dolžino $\lambda = 632.8\text{nm}$ vpada pod Brewster-jev kot θ_B na stekleno ploščo debeline $d = 15\text{mm}$. Izračunajte največjo moč prepuščenega žarka $P_p = ?$ v zraku na drugi strani ploščice, če ima steklo lomni količnik $n = 1.6$ in slabljenje $a = 100\text{dB/m}$! Polarizacijo laserja nastavimo za največjo prepuščeno moč.

Izberem TM, da ni odbojev!

$$l = \frac{d}{\cos \theta_B} = d \sqrt{1 + \left(\frac{1}{n}\right)^2} = 15\text{mm} \sqrt{1 + \left(\frac{1}{1.6}\right)^2} = 17.7\text{mm}$$

zrak: $\theta_B = \arctg n$
 steklo: $\theta_B' = \arctg \left(\frac{1}{n}\right)$ $\cos \theta_B' = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{1}{n}\right)^2}}$ $P_p = P_v \cdot 10^{-\frac{al}{10}} = 2\text{mW} \cdot 10^{-\frac{1.77}{10}} = 1.33\text{mW}$

2. Mnogorodovno vlakno 50/125 μm ima oblogo iz čistega kremenovega stekla $n_2 = 1.46$ 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! Kolikšen je domet $l' = ?$ za idealno gradientno vlakno?

$$n_1 = \sqrt{n_2^2 + NA^2} = 1.474 ; \Delta \approx \frac{1}{2} \left(\frac{NA}{n_1}\right)^2 = 0.0092 ; \Delta t = \frac{T}{4} = \frac{1}{4C} = 7.35\text{ns}$$

Stopničasto

$$\text{Vlakno: } \Delta t = \frac{l n_1 \Delta}{c_0} \rightarrow l = \frac{\Delta t c_0}{n_1 \Delta} = 162.5\text{m}$$

Gradientno

$$\text{Vlakno: } \Delta t \approx \frac{l n_1 \Delta^2}{c_0} \rightarrow l = \frac{\Delta t c_0}{n_1 \Delta^2} = 17.6\text{km}$$

3. InGaAsP polprevodniški laser za osrednjo valovno dolžino $\lambda = 1320\text{nm}$ vsebuje Fabry-Perot-ov rezonator, kjer so zrcala kar stranice čipa. Dolžina laserskega čipa znaša $l = 550\mu\text{m}$, srednji lomni količnik valovoda je $n = 3.6$. Izračunajte vzdolžno koherentno dolžino $d = ?$ laserske svetlobe, če laser istočasno niha na $N = 7$ vzdolžnih rodovih! ($c = 3E+8\text{m/s}$)

$$\Delta f = N \frac{c_0}{2ln} \quad d = \frac{c_0}{\Delta f} = \frac{2ln}{N} = \frac{2 \cdot 550 \cdot 10^{-6} \text{m} \cdot 3.6}{7} = 566 \cdot 10^{-6} \text{m} = 566\mu\text{m}$$

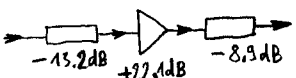
4. Daljinec za televizor odda sporočilo z zmogljivostjo $C = 1\text{kbit/s}$ na valovni dolžini $\lambda = 900\text{nm}$. Svetleča dioda daljinca odda enico z močjo $P_0 = 20\text{mW}$ enakomerno na vse strani. Televizor na oddaljenosti $r = 5\text{m}$ od daljinca je opremljen s silicijevo PIN fotodiodo s površino $A = 1\text{mm}^2$, kvantnim izkoristkom $\eta = 80\%$ in kapacitivnostjo $C_d = 80\text{pF}$. Izračunajte napetost signala $U_s = ?$ na fotodiodi, ki jo povzroči oddana enica v sporočilu! ($Q_e = -1.6E-19\text{As}$, $h = 6.625E-34\text{Js}$, $c = 3E+8\text{m/s}$)

$$P_s = P_0 \frac{A}{4\pi r^2} = 20 \cdot 10^{-3} \text{W} \frac{10^{-6} \text{m}^2}{4\pi \cdot 25 \text{m}^2} = 63.7 \text{pW}$$

$$U_s = \frac{Q}{C_d} = \frac{\eta}{C_d} \frac{|Q_e|}{hf} \frac{P_s}{C} = \frac{\eta |Q_e| \lambda P_s}{C_d h c C} = \frac{0.8 \cdot 1.6 \cdot 10^{-19} \text{As} \cdot 900 \cdot 10^{-9} \text{m} \cdot 63.7 \cdot 10^{-12} \text{W}}{80 \cdot 10^{-12} \text{F} \cdot 6.625 \cdot 10^{-34} \text{Js} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{m/s} \cdot 10^3 \text{s}^{-1}} = 461 \mu\text{V}$$

5. Odsek vlakna G.652 dolžine $l = 60\text{km}$ s slabljenjem $a = 0.22\text{dB/km}$ in disperzijo $D = 17\text{ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ 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 $D_k = -80\text{ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ in slabljenjem $a_k = 0.7\text{dB/km}$. Kolikšno naj bo ojačenje ojačevalnika $G = ?$, če mora nadomestiti slabljenje kabla in tudi slabljenje kompenzacijskega vlakna?

$$l \cdot D + l_k D_k = 0 \quad G = al + a_k l_k = 0.22\text{dB/km} \cdot 60\text{km} + 0.7\text{dB/km} \cdot 12.75\text{km} = 22.1\text{dB}$$

$$l_k = -\frac{al}{D_k} = 12.75\text{km}$$


1. Izračunajte lomni količnik tekočine $n=?$, če postane odbiti žarek popolnoma polariziran pri vpadnem kotu $\theta=60^\circ$ stopinj iz praznega prostora nad gladino tekočine! Kolikšen delež moči nepolariziranega vpadnega žarka $P_o/P_v=?$ se tedaj odbije od gladine tekočine? ($\lambda=0.5\mu\text{m}$)

$$n = \tan \theta = \tan 60^\circ = \sqrt{3} = \underline{1.732} \quad \Gamma_{TM} = 0 \quad \Gamma_{TE} = \frac{\cos \theta - \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}}{\cos \theta + \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}} = \frac{1 - n^2}{1 + n^2} = \underline{-0.5}$$

$$P_o/P_v = \frac{1}{2} (|\Gamma_{TE}|^2 + |\Gamma_{TM}|^2) = \frac{1}{2} (0.25 + 0) = \underline{0.125 = 12.5\%}$$

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 $2r_1=15\text{mm}$, zunanji premer kremenove cevi $2r_2=25\text{mm}$. Končni izdelek mora imeti zunanji premer $2r=125\mu\text{m}$, numerično aperturo $NA=0.08$ ter mejno valovno dolžino $\lambda=1.27\mu\text{m}$ za enorodovno delovanje! Difuzijo germanija pri vlečenju vlakna zanemarimo.

$$V = 2.405 = k_a NA \quad \frac{A_{\text{edra}}}{A_{\text{obloga}}} = \frac{\pi a^2}{\pi (r^2 - a^2)} = \frac{\pi (r_1^2 - (r_1 - d)^2)}{\pi (r_2^2 - r_1^2)}$$

$$a = \frac{V \lambda}{2\pi NA} = \frac{2.405 \cdot 1.27 \mu\text{m}}{2\pi \cdot 0.08} = \underline{6.08 \mu\text{m}}$$

$$n_1 = \sqrt{NA^2 + n_2^2} = \underline{1.4622} \quad d = r_1 - \sqrt{r_1^2 - \frac{a^2 (r_2^2 - r_1^2)}{r_2^2 - a^2}} = \underline{0.0639 \text{mm} = 63.9 \mu\text{m}}$$

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 $f=194.7\text{THz}$. ($c=3E+8\text{m/s}$)

$$d = \frac{\lambda}{2} = \frac{\lambda_0}{2n} = \frac{c}{2nf} = \underline{0.2201 \mu\text{m} = 220.1 \text{nm}}$$

4. PIN fotodioda ima pri valovni dolžini $\lambda=1.3\mu\text{m}$ kvantni izkoristek $\eta=0.7$ in kapacitivnost spoja $C=2\text{pF}$. Izračunajte spremembo napetosti $\Delta U=?$ na priključkih fotodiode, ko fotodioda sprejme logično enico podatkovnega niza s hitrostjo $C=140\text{Mbit/s}$. Podatkovni niz s povprečno svetlobno močjo $P=-35\text{dBm}$ vsebuje 50% enic (vključen izvor svetlobe) in 50% ničel (izključen izvor svetlobe). ($h=6.624E-34\text{Js}$, $c=3E+8\text{m/s}$, $k_B=1.38E-23\text{J/K}$, $Q_e=1.6E-19\text{As}$)

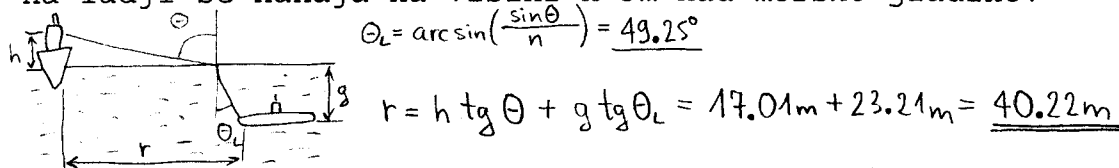
$$\Delta U = \frac{\Delta Q}{C} = \frac{N_e |Q_e|}{C} = \frac{\eta N_f |Q_e|}{C} = \underline{0.001655 \text{V} = 1.655 \text{mV}}$$

$$P = -35 \text{dBm} = \underline{316 \text{nW}} \quad N_f = \frac{2P}{W_f C} = \frac{2P\lambda}{hc C} = \underline{29553}$$

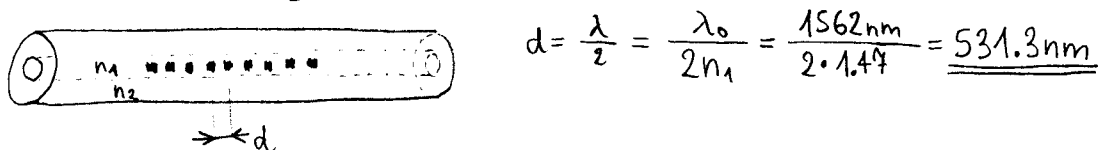
5. Erbijev optični ojačevalnik z izhodno močjo $P_s=+17\text{dBm}$ na valovni dolžini $\lambda_s=1550\text{nm}$ črpamo s svetlobno črpalko na valovni dolžini $\lambda_c=1480\text{nm}$. Izračunajte število fotonov $N=?$, ki jih črpalka v času $t=1\text{s}$ pošlje v ojačevalno vlakno, če znaša izkoristek črpanja $\eta=70\%$? Kolikšna je izhodna svetlobna moč črpalke $P_c=?$ ($h=6.624E-34\text{Js}$, $c=3E+8\text{m/s}$)

$$P_s = +17 \text{dBm} = \underline{50 \text{mW}} \quad P_c = \frac{P_s \lambda_s}{\eta \lambda_c} = \underline{74.8 \text{mW}} \quad N = \frac{P_c t \lambda_c}{hc} = \underline{5.57 \cdot 10^{17}}$$

1. Podmornica pluje na globini $g=20\text{m}$ pod morsko gladino. Na kakšni (vodoravni) razdalji $r=?$ jo lahko opazi posadka površinske ladje, če morski valovi onemogočajo opazovanje pri vpadnih kotih večjih od $\theta=80^\circ$? Lomni količnik zraka je enak enoti, lomni količnik vode je $n=1.3$. Opazovalec na ladji se nahaja na višini $h=3\text{m}$ nad morsko gladino.



2. V enorodovno optično vlakno z lomnim količnikom jedra $n_1=1.47$ in lomnim količnikom obloge $n_2=1.46$ s pomočjo UV svetlobe vrišemo uklonsko mrežico. Izračunajte periodo ponavljanja mrežice $d=?$, če naj mrežica odbija svetlobo z valovno dolžino $\lambda=1562\text{nm}$ v smeri nazaj v vlaknu! Valovna dolžina svetlobe je dovolj majhna, da širjenje svetlobe v oblogi lahko zanemarimo.



3. Polprevodniški FP laser za $\lambda=850\text{nm}$ vsebuje valovod širine $w=5\mu\text{m}$ in višine $h=1.5\mu\text{m}$. Določite največjo dopustno izhodno moč laserja $P_{\max}=?$, ki jo omejuje električni preboj $E_{\max}=2.0\text{E}+6\text{V/m}$ v zraku tik nad površino čipa! Lomni količnik polprevodnika je $n=3.7$, lomni količnik zraka je enak enoti. ($c=3\text{E}+8\text{m/s}$, $Z_0=377\Omega$)

$$S = \frac{E_{\max}^2}{2Z_0} = 5.305 \cdot 10^9 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \quad P = S \cdot A = S \cdot w \cdot h = \underline{39.79\text{mW} = +16\text{dBm}}$$

4. Policijski merilnik hitrosti vozil vsebuje laser na valovni dolžini $\lambda=900\text{nm}$ z vršno (pulzno) izhodno močjo $P=10\text{W}$. Kolikšna mora biti površina $A=?$ fotodiode v sprejemniku v avtomobilu, da bo ta na razdalji $r=500\text{m}$ pravočasno opozoril voznika, naj zmanjša hitrost? Silicijeva fotodioda ima kvantni izkoristek $\eta=80\%$. Sprejemnik še zazna tok $I=10\mu\text{A}$. Optika merilnika hitrosti osvetli krog premera $d=1\text{m}$ na omenjeni razdalji. ($c=3\text{E}+8\text{m/s}$, $h=6.624\text{E}-34\text{Js}$, $q_e=-1.6\text{E}-19\text{As}$)

$$P_s = \frac{I h c_0}{\eta |q_e| \lambda} = \underline{17.25\mu\text{W}} \quad A = \frac{P_s}{P} \pi \left(\frac{d}{2}\right)^2 = \underline{1.3548 \cdot 10^{-6} \text{m}^2 = 1.3548 \text{mm}^2}$$

5. Erbijev optični ojačevalnik izključimo tako, da najprej odklopimo vhodni signal, za tem pa izključimo še črpalni laser na $\lambda=980\text{nm}$. Po izklopu črpalke ojačevalnik odda še $W=1\text{mJ}$ svetlobne energije v obliki spontanega sevanja z valovno dolžino $\lambda_s=1550\text{nm}$. Koliko $N=?$ erbijevih ionov Er^{3+} vsebuje ojačevalno vlakno? ($c=3\text{E}+8\text{m/s}$, $h=6.624\text{E}-34\text{Js}$)

$$N = \frac{W}{W_f} = \frac{W}{h f} = \frac{W \lambda}{h c_0} = \underline{7.7999 \cdot 10^{15} \text{ionov}}$$

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 vlakna $NA = ?$, da se odbita svetloba ne ujame v jedru vlakna z lomnim količnikom $n_1 = 1.47$? ($\lambda = 1.3 \mu\text{m}$, $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$)

$$NA = \sin \alpha_0 = n_1 \sin \alpha = 1.47 \cdot \sin 8^\circ = \underline{\underline{0.2046}}$$

2. Svetlobno vlakno izdelamo s tehnologijo MCVD tako, da nanesemo plast z višjim lomnim količnikom $n_1 = 1.47$ na notranjo steno cevi iz čistega kremenovega stekla z lomnim količnikom $n_2 = 1.46$, zunanjim premerom $d_2 = 25 \text{ mm}$ in notranjim premerom $d_1 = 10 \text{ mm}$. Kolikšna naj bo debelina nanešene plasti $d = ?$, da bo imelo izdelano vlakno zunanji premer $d_v = 125 \mu\text{m}$ in mejno valovno dolžino enorodovnega delovanja $\lambda = 1.2 \mu\text{m}$?

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = 0.1712 \quad \frac{A_{\text{jedra}}}{A_{\text{obloge}}} = \frac{\pi a^2}{\pi \left[\left(\frac{d_2}{2} \right)^2 - a^2 \right]} = \frac{\pi \left(\frac{d_1}{2} \right)^2 - \left(\frac{d_2}{2} \right)^2}{\pi \left(\frac{d_2}{2} \right)^2 - \left(\frac{d_1}{2} \right)^2}$$

$$V = 2.405 = \frac{2\pi}{\lambda} a NA \quad d = \frac{d_1}{2} - \sqrt{\left(\frac{d_2}{2} \right)^2 - \frac{a^2 \left[\left(\frac{d_1}{2} \right)^2 - \left(\frac{d_2}{2} \right)^2 \right]}{\left(\frac{d_1}{2} \right)^2 - a^2}} = \underline{\underline{0.0243 \text{ mm} = 24.3 \mu\text{m}}}$$

3. Polarizirana HeNe laserska cev oddaja svetlobo z valovno dolžino $\lambda = 632.8 \text{ nm}$. S hitro fotodiodo opazimo utripanje moči s frekvenco $f = 450 \text{ MHz}$ in višjimi harmoniki te frekvence. Izračunajte dolžino cevi $l = ?$ (razdaljo med zrcali), če upoštevamo, daje lomni količnik ionizirane plinske zmesi zelo blizu enote! ($c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$)

$$l = \frac{c}{2fn} = \underline{\underline{0.333 \text{ m} = 33.3 \text{ cm}}}$$

$$n \sim 1$$

4. Izračunajte tok $I = ?$ skozi silicijevo fotodiodo, na katero vpada svetloba moči $P = 100 \text{ nW}$ z valovno dolžino $\lambda = 780 \text{ nm}$! Površina fotodiode je prekrita z antirefleksnim slojem, kvantni izkoristek fotodiode znaša $\eta = 75\%$. Fotodioda je priključena na dovolj nizko zaporno napetost, da je plazovno ojačenje zanemarljivo. Prav tako je zanemarljiv tudi temni tok. ($c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$, $h = 6.625 \times 10^{-34} \text{ Js}$, $q_e = -1.6 \times 10^{-19} \text{ As}$, $m_e = 9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$)

$$I = \eta P \frac{|q_e|}{W_f} = \eta P \frac{|q_e|}{hc} \lambda = \underline{\underline{4.71 \cdot 10^{-8} \text{ A} = 47.1 \text{ nA}}}$$

5. Izračunajte domet $d = ?$ zveze po svetlobnem vlaknu z nekompenziranim disperzijskim koeficientom $D = +17 \text{ ps/(nm.km)}$ pri valovni dolžini $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$. Oddajnik vsebuje svetlobni izvor s spektralno širino $B = 500 \text{ GHz}$, svetlobni impulzi pa naj se ne razširijo za več kot $t_{\text{max}} = 1 \text{ ns}$. ($c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$)

$$\Delta \lambda = \frac{\lambda^2}{c_0} B = 4.0042 \text{ nm} \quad l = \frac{\Delta t}{\Delta \lambda D} = \underline{\underline{14.69 \text{ km}}}$$

1. Svetlobno vlakno z jedrom z lomnim količnikom $n_1=1.464$ in oblogo z lomnim količnikom $n_2=1.461$ odrežemo pod pravim kotom in potopimo v prozorno tekočino z neznanim lomnim količnikom $n_t=?$. Izračunajte lomni količnik tekočine $n_t=?$, če znaša slabljenje odbitega vala na meji vlakno/tekočina $a=30\text{dB}$!

$$a = 30\text{dB} = \frac{1000}{|r|^2} \quad \theta = 0 \rightarrow |r_{TE}| = |r_{TM}| = \left| \frac{n_t - n_1}{n_t + n_1} \right|$$

$$|r| = \frac{1}{\sqrt{a}} = 0.0346$$

$$\rightarrow n_t = n_1 \frac{1 \pm |r|}{1 \mp |r|} = 1.560 \text{ ali } 1.374$$

2. Svetlobno vlakno ima pri $\lambda_1=1.3\mu\text{m}$ slabljenje $a_1=0.35\text{dB/km}$, pri $\lambda_2=1.4\mu\text{m}$ slabljenje $a_2=1.5\text{dB/km}$ in pri $\lambda_3=1.5\mu\text{m}$ slabljenje $a_3=0.2\text{dB/km}$. Kolikšna slabljenja $a_1', a_2', a_3'=?$ pričakujemo pri istih valovnih dolžinah, če z izboljšano tehnologijo zmanjšamo vsebnost OH⁻ ionov za faktor $N=10$ -krat?

OH⁻ ioni imajo vpliva na $1.3\mu\text{m}$ in $1.5\mu\text{m}$:

$$a_1' = a_1 = 0.35\text{dB/km}$$

$$a_3' = a_3 = 0.2\text{dB/km}$$

Ostala slabljenja pri $1.4\mu\text{m}$: $a_0 = \frac{a_1 + a_3}{2} = 0.275\text{dB/km}$

Prvotno slabljenje OH⁻: $a_{OH} = a_2 - a_0 = 1.225\text{dB/km}$

Izboljšano slabljenje OH⁻: $a_{OH}' = a_{OH}/N = 0.1225\text{dB/km}$

Celotno izboljšano $a_2' = a_0 + a_{OH}' = 0.3975\text{dB/km}$

3. Polprevodniški laser za $\lambda=1.3\mu\text{m}$ s FP rezonatorjem daje pri toku $I_1=20\text{mA}$ izhodno moč $P_1=+3\text{dBm}$, pri toku $I_2=25\text{mA}$ pa izhodno moč $P_2=+7\text{dBm}$. Izračunajte pragovni tok laserja $I_t=?$, če ostane med poskusi temperatura laserja nespremenjena: $T=25^\circ\text{C}$!

$$P_1 = +3\text{dBm} = 2\text{mW}$$

$$P_2 = +7\text{dBm} = 5\text{mW}$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{I_1 - I_p}{I_2 - I_p} \rightarrow P_1 I_2 - P_1 I_p = P_2 I_1 - P_2 I_p$$

$$I_p = \frac{P_2 I_1 - P_1 I_2}{P_2 - P_1} = \frac{5\text{mW} \cdot 20\text{mA} - 2\text{mW} \cdot 25\text{mA}}{5\text{mW} - 2\text{mW}} = 16.67\text{mA}$$

4. Izračunajte odzivnost $I/P=?$ fotopomnoževalke, ki vsebuje fotokatodo s kvantnim izkoristokom $\eta=20\%$ pri valovni dolžini $\lambda=514\text{nm}$ in $N=8$ množilnih elektrod s povprečnim faktorjem množenja $M=4.5$! ($h=6.624 \cdot 10^{-34}\text{Js}$, $Q_e=-1.6 \cdot 10^{-19}\text{As}$, $c=3 \cdot 10^8\text{m/s}$)

$$f = \frac{c}{\lambda}$$

$$I = \frac{P}{hf} \eta |Q_e| M^N$$

$$I/P = \frac{\eta |Q_e|}{h c} M^N = \frac{0.2 \cdot 1.6 \cdot 10^{-19}\text{As}}{6.624 \cdot 10^{-34}\text{Js} \cdot 3 \cdot 10^8\text{m/s}} 4.5^8 = 13918 \text{ A/W}$$

5. V laboratorijskem preizkusu $C=2.488\text{Gbps}$ zveze peljemo takt po kratki žici iz oddajnika v sprejemnik, podatki pa grejo preko $l=50\text{km}$ dolgega svetlobnega vlakna s koeficientom barvne disperzije $D=+17\text{ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$. Za koliko nm $\Delta\lambda=?$ se sme spremeniti valovna dolžina laserja, ki nazivno dela na $\lambda=1.55\mu\text{m}$, da se podatki ne premaknejo glede na takt za več kot $\Delta t=10\%$. T bitne periode?

$$\Delta t = D \Delta\lambda l = 0.1 T = \frac{0.1}{C} \rightarrow \Delta\lambda = \pm \frac{0.1}{D l C} = \pm 0.0473\text{nm}$$

1. Dvolomna snov ima lomna količnika $n_{TE}=2.05$ in $n_{TM}=2.2$. Izračunajte debelino ploščice $d=?$ iz takšne snovi, da se polarizacija svetlobe pri prehodu skozi snov ne spremeni! Valovna dolžina svetlobe znaša $\lambda=514\text{nm}$ v praznem prostoru. Poiščite vse rešitve naloge! ($c=3E+8\text{m/s}$)

$$k_{TM}d - k_{TE}d = m \cdot 2\pi ; m=1,2,3,4...$$

$$(n_{TM} - n_{TE}) \frac{2\pi}{\lambda} d = m \cdot 2\pi \rightarrow d = \frac{\lambda m}{n_{TM} - n_{TE}} = \underline{m \cdot 3.427 \mu\text{m}}$$

2. Mnogorodovno gradientno vlakno s premerom jedra $2r_j=50\mu\text{m}$ in premerom obloge $2r_o=125\mu\text{m}$ ima največjo numerično aperturo $NA_{\text{max}}=0.25$ v osi vlakna in parabolični potek lomnega količnika v jedru vlakna. Določite numerično aperturo $NA=?$ na razdalji $r=20\mu\text{m}$ od osi vlakna!

$$n_1 = n_{1\text{max}} - \left(\frac{r}{r_j}\right)^2 (n_{1\text{max}} - n_2) \quad NA = \sqrt{(NA_{\text{max}}^2 + n_2^2) \left(1 - \left(\frac{r}{r_j}\right)^2\right) + \left(\frac{r}{r_j}\right)^4 n_2^2 + 2\sqrt{NA_{\text{max}}^2 + n_2^2} \left(1 - \left(\frac{r}{r_j}\right)^2\right) \left(\frac{r}{r_j}\right)^2 n_2 - n_2^2}$$

$$NA \approx NA_{\text{max}} \sqrt{1 - \left(\frac{r}{r_j}\right)^2} = 0.25 \cdot 0.6 = \underline{0.15}$$

3. Vlakenski laser (oscilator) vsebuje $l=5\text{cm}$ dolgo Er^{3+} vlakno. Frekvenčno selektivna zrcala (vlakenski uklonski mrežici) na obeh koncih aktivnega vlakna omogočata enorodovno delovanje na valovni dolžini $\lambda=1553\text{nm}$. Izračunajte premik valovne dolžine $\Delta\lambda$, če s piezoelektričnim aktuatorjem nategnemo aktivno vlakno za $\Delta l=1\mu\text{m}$ in pri tem laser ne preskoči na drugačen rod nihanja! ($n_{\text{jedra}}=1.463$, $c=3E+8\text{m/s}$)

$$m \cdot 2\pi = k \cdot 2l + \phi_1 + \phi_2 \approx n_j \frac{2\pi}{\lambda_0} 2l \quad m \gg 1 \quad l = 5\text{cm} = 5 \cdot 10^4 \mu\text{m}$$

$$\lambda_0 = \frac{2ln_j}{m} ; \Delta\lambda = \frac{2\Delta ln_j}{m} = \Delta l \frac{\lambda_0}{l} = 1\mu\text{m} \frac{1553\text{nm}}{5 \cdot 10^4 \mu\text{m}} = \underline{0.031\text{nm} = 31\text{pm}}$$

4. PIN-FET sprejemnik s fotodiodo s kapacitivnostjo $C_d=3\text{pF}$ in kvantnim izkoristkom $\eta=70\%$ omogoča sprejem signala s povprečno $N=3000$ fotoni/bit na valovni dolžini $\lambda=1.3\mu\text{m}$. Kolikšna bo občutljivost sprejemnika $N'=?$, če vgradimo boljšo fotodiodo s kapacitivnostjo $C_d'=1\text{pF}$ in kvantnim izkoristkom $\eta'=80\%$? Vhodna kapacitivnost tranzistorja ostane enaka $C_g=1\text{pF}$. ($Q_e=-1.6E-19\text{As}$, $c=3E+8\text{m/s}$, $h=6.624E-34\text{Js}$)

$$U_s = \frac{N_q |Q_e|}{C_d + C_g} \quad \left(\frac{U_s}{U_m}\right) = \text{konst.}$$

$$U_m = \sqrt{\frac{k_B T}{2\pi(C_d + C_g)}} \quad N' = N \frac{\eta}{\eta'} \sqrt{\frac{C_d' + C_g}{C_d + C_g}} = 3000 \frac{0.7}{0.8} \sqrt{\frac{1\text{pF} + 1\text{pF}}{3\text{pF} + 1\text{pF}}} = \underline{1856 \text{ fotoni/bit}}$$

5. Na vhod optičnega ojačevalnika z Er^{3+} vlaknom in črpalko na $\lambda=1480\text{nm}$ (delna inverzna naseljenost, $N_2=80\%N$, $N_1=20\%N$) pripeljemo signal z valovno dolžino $\lambda=1550\text{nm}$ in močjo $P=-7\text{dBm}$. Izračunajte razmerje signal/šum (v dB) na izhodu ojačevalnika, kjer večino šuma predstavlja ojačeno spontano sevanje laserskega ojačevalnika v pasovni širini $B=4\text{THz}$ na obeh ortogonalnih polarizacijah! ($c=3E+8\text{m/s}$, $h=6.624E-34\text{Js}$)

$$P_s = P G ; P = -7\text{dBm} = 0.2\text{mW} \quad \left(\frac{S}{N}\right) = \frac{P \lambda}{2\mu h c B} = \frac{0.2 \cdot 10^{-3} \text{W} \cdot 1550 \cdot 10^{-9} \text{m}}{2 \cdot 1.333 \cdot 6.624 \cdot 10^{-34} \text{Js} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{m/s} \cdot 4 \cdot 10^{12} \text{s}^{-1}}$$

$$P_N = 2\mu(G-1)hfB ; G \gg 1 \quad \left(\frac{S}{N}\right) = 146.3 = \underline{21.65\text{dB}}$$

$$\text{OBE POLARIZACIJA} \quad \mu = \frac{N_2}{N_2 - N_1} = 1.333$$

1. Izračunajte največje slabljenje $a=?$ (v decibelih) mehanskega spoja dveh vlaken, ki nastane zaradi zelo tanke zračne reže d med konci vlaken. Vlakni sta mnogorodovni, gradientni, z jedrom $2r_j=62.5\mu\text{m}$ in $n_1=1.47$ ter oblogo $2r_o=125\mu\text{m}$ in $n_2=1.46$. Širina reže $d \ll 2r_j$ je majhna v primerjavi izmerami jedra, odboja se seštejeta v fazi.

$$|\Gamma| = \left| \frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \right| = 0.19 \quad a \approx 10 \log_{10} (1 - |2\Gamma|^2) = \underline{\underline{-0.68 \text{ dB}}}$$

DVA SOFAZNA ODBOJA

2. Izračunajte premer jedra $2r_j=?$ in lomni količnik jedra $n_1=?$ vlakna za črpalni laser v svetlobnem ojačevalniku. Laser potrebuje enorodovno vlakno na valovni dolžini $\lambda=970\text{nm}$ z numerično aperturo $NA=0.15$. Obloga je izdelana iz čistega kremenovega stekla z lomnim količnikom $n_2=1.46$.

$$V = k_0 r_j NA = 2.405 \quad NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

$$2r_j = 2 \frac{2.405 \lambda}{2\pi NA} = \underline{\underline{4.95 \mu\text{m}}} \quad n_1 = \sqrt{n_2^2 + NA^2} = \underline{\underline{1.4677}}$$

3. HeNe laserska cev dolžine $l=150\text{mm}$ niha na enem samem rodu z valovno dolžino $\lambda=632.8\text{nm}$. Razdalja med zrcali se zaradi segrevanja cevi povečuje in cev preskoči na nov rod. Pri kolikšnem podaljšanju cevi $\Delta l=?$ bo frekvenca novega rodu natančno enaka frekvenci starega rodu pred podaljšanjem cevi? Lomni količnik plinske zmesi je enak enoti, $c=3E+8\text{m/s}$.

$$\lambda = \frac{2l}{N} = \frac{2(l+\Delta l)}{N+1} \quad \Delta l = \frac{l}{N} = \frac{\lambda}{2} = \underline{\underline{316.4 \text{ nm}}}$$

$$\frac{N+1}{N} = \frac{l+\Delta l}{l} \rightarrow 1 + \frac{1}{N} = 1 + \frac{\Delta l}{l}$$

4. PIN-FET modul vsebuje fotodiodo s kvantnim izkoristkom $\eta=70\%$ ter ojačevalnik s transimpedanco $R_t=3\text{k}\Omega$. Pri vhodni svetlobni moči $P=-30\text{dBm}$ daje modul izhodno napetost $U=2.2\text{mV}$. Izračunajte valovno dolžino vpadne svetlobe $\lambda=?$ Temni tok fotodiode je zanemarljivo majhen. ($h=6.624E-34\text{Js}$, $c=3E+8\text{m/s}$, $q_e=-1.6E-19\text{As}$)

$$I = \frac{P \eta |q_e|}{hf} \quad U = \frac{R_t P \eta |q_e|}{hc} \lambda \quad P = -30\text{dBm} = \underline{\underline{1 \mu\text{W}}}$$

$$U = IR_t \quad f = \frac{c}{\lambda} \quad \lambda = \frac{Uhc}{R_t P \eta |q_e|} = \underline{\underline{1301.1 \text{ nm}}}$$

5. Izračunajte izhodno moč $P=?$ erbijevega vlakenskega ojačevalnika na valovni dolžini $\lambda=1570\text{nm}$! Ojačevalnik zmore izhodno moč $P'=+14\text{dBm}$ na valovni dolžini $\lambda'=1530\text{nm}$. Črpalka uporablja valovno dolžino $\lambda_{\text{črpa}}=980\text{nm}$ in privzamemo, da se izkoristek črpanja ne spreminja z valovno dolžino signala. ($h=6.624E-34\text{Js}$)

$$P = h \frac{c}{\lambda} \frac{dN}{dt} \quad P' = h \frac{c}{\lambda'} \frac{dN}{dt} \quad P = \frac{\lambda'}{\lambda} P' = \underline{\underline{24.48 \text{ mW} = +13.89 \text{ dBm}}}$$

$P' = +14 \text{ dBm} = 25.12 \text{ mW}$

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 $\lambda_{d1} = 980 \text{ nm}$ in $\lambda_{d2} = 1550 \text{ nm}$ hkrati! Lomni količnik obloge znaša $n_2 = 1.462$. Kolikšna je numerična apertura $NA = ?$ takšnega vlakna?

$$V = k_0 a NA = 2.405 \quad \lambda = 980 \text{ nm} \quad NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

$$NA = \frac{2.405 \lambda}{2\pi a} = 0.25 \quad n_1 = \sqrt{n_2^2 + NA^2} = 1.483$$

2. Močno dvolomno PANDA vlakno ima utripno dolžino $LAMBDA = 3 \text{ mm}$ (dolžina, ko naraste fazni zamik med rodovoma s pravokotnima polarizacijama na 2π). Kolikšna je razlika lomnih količnikov $\Delta n = ?$ za obe polarizaciji? Povprečni lomni količnik stekla je $n = 1.463$ pri frekvenci $f = 194 \text{ THz}$. ($c = 3E+8 \text{ m/s}$)

$$(n_A - n_B) \Lambda = 2\pi \quad \frac{\omega}{c_0} \Delta n \Lambda = 2\pi$$

$$\left(\frac{\omega}{c_0} n_A - \frac{\omega}{c_0} n_B\right) \Lambda = 2\pi \quad \Delta n = \frac{c_0}{f \Lambda} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{194 \cdot 10^{12} / \text{s} \cdot 3 \cdot 10^{-3} \text{ m}} = 5.15 \cdot 10^{-4}$$

3. Polprevodniški laser na valovni dolžini $\lambda = 850 \text{ nm}$ je sklopljen na mnogorodovno vlakno s stopničastim lomnim likom, premerom jedra $2a = 100 \mu\text{m}$ in numerično aperturo $NA = 0.2$. Kolikšna je vzdolžna koherentna dolžina $d = ?$ laserske svetlobe, če pojav interference med rodovi izgine pri dolžini vlakna $l = 10 \text{ m}$? ($n_2 = 1.46$, $c = 3E+8 \text{ m/s}$)

$$t_1 = \frac{l n_1}{c_0} \quad \Delta t = t_2 - t_1 = \frac{l n_1}{c_0} \left(\frac{n_1}{n_2} - 1\right) \approx \frac{l}{c_0 n_2} \frac{(n_1 + n_2)(n_1 - n_2)}{2} = \frac{l NA^2}{2 c_0 n_2}$$

$$t_2 = \frac{t_1}{\sin \theta_k} \quad d = c_0 \Delta t \approx \frac{l NA^2}{2 n_2} = \frac{10 \text{ m} \cdot 0.2^2}{2 \cdot 1.46} = 0.137 \text{ m}$$

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

4. Fotopomnoževalka ima fotokatodo s kvantnim izkoristkom $\eta = 35\%$ in skupni faktor množenja $M = 2.5E+9$. Koliko fotonov $N = ?$ zelene svetlobe argonskega laserja z valovno dolžino $\lambda = 514 \text{ nm}$ pade v eni sekundi ($t = 1 \text{ s}$) na fotokatodo, če znaša anodni tok $I_a = 100 \mu\text{A}$? ($h = 6.624E-34 \text{ Js}$, $c = 3E+8 \text{ m/s}$, $Q_e = -1.6E-19 \text{ As}$)

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

$$N = \frac{I t}{\eta |Q_e| M} = \frac{100 \cdot 10^{-6} \text{ A} \cdot 1 \text{ s}}{0.35 \cdot 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ As} \cdot 2.5 \cdot 10^9} = 7.14 \cdot 10^5$$

5. Zveza vsebuje $l = 17 \text{ km}$ svetlobnega vlakna, ki ima pri valovni dolžini $\lambda = 1550 \text{ nm}$ koeficient barvne disperzije $D_b = 5 \text{ ps/(nm.km)}$ in koeficient polarizacijske disperzije $D_p = 1 \text{ ps/sqrt(km)}$. Pri kateri širini spektra izvora $\Delta f = ?$ bosta učinka obeh disperzij enako velika? ($c = 3E+8 \text{ m/s}$)

$$\Delta t = D_p \sqrt{l} = D_b l \Delta \lambda \quad \Delta f = \frac{c_0}{\lambda^2} \Delta \lambda = 6.06 \text{ GHz}$$

$$\Delta \lambda = \frac{D_p}{D_b \sqrt{l}} = 0.049 \text{ nm} = 4.851 \cdot 10^{-11} \text{ m}$$

=====

1. Valovanje s frekvenco $f=30\text{GHz}$ se popolnoma odbije na meji vosek/zrak. Izračunajte razdaljo v zraku $d=?$, kjer eksponentno usihajoče polje upade na $1/e$ vrednosti ob meji snovi! Valovanje vpada na mejo snovi pod kotom $\theta=45^\circ$. Relativna dielektričnost voska je $\epsilon_r=2.2$, relativno dielektričnost zraka privzamemo enako enoti. ($c=3E+8\text{m/s}$)

$$\lambda_0 = \frac{c_0}{f} = 1\text{cm} \quad k_0 = k_z = k_v \sin \theta = \frac{2\pi}{\lambda} \sin \theta = 658.99\text{rd/m}$$

$$k_0 = \frac{2\pi}{\lambda} = 628.32\text{rd/m}$$

$$\lambda_v = \frac{\lambda_0}{n_v} = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_r}} = 6.74\text{mm} \quad |k_x| = \sqrt{k_0^2 - k_z^2} = 198.69\text{rd/m} \quad d = \frac{1}{|k_x|} = 5.033\text{mm}$$

2. Pri enorodovnem optičnem vlaknu G.652 dolžine $l=60\text{km}$ izmerimo razliko v zakasnitvi TE in TM valovanja $\Delta t=30\text{ps}$. Izračunajte razliko lomnih količnikov $\Delta n=?$ med obema polarizacijama, če znaša povprečni lomni količnik vlakna $n=1.46$ pri valovni dolžini $\lambda=1550\text{nm}$! ($c=3E+8\text{m/s}$)

$$t_1 = \frac{l}{v_1} = \frac{ln_1}{c_0}$$

$$t_2 = \frac{ln_2}{c_0}$$

$$\Delta t = \frac{l}{c_0} \Delta n \rightarrow \Delta n = \frac{c_0}{l} \Delta t = 1.5 \cdot 10^{-4}$$

3. Določite kot $\alpha=?$ med izvornim žarkom in uklonjenim žarkom v praznem prostoru za Bragg-ovim akustooptičnim stikalom! Piezoelektrični pretvornik napajamo frekvenco $f=100\text{MHz}$, hitrost zvočnega valovanja v stikalu v snovi z lomnim količnikom $n=1.5$ znaša $v=4\text{km/s}$. Valovna dolžina svetlobe je $\lambda=488\text{nm}$ v praznem prostoru.

$$\frac{\lambda_0}{2} = \Lambda \sin \frac{\alpha}{2} \quad \Lambda = \frac{v}{f}$$

$$\alpha = 2 \arcsin \frac{\lambda_0}{2\Lambda} = 2 \arcsin \frac{\lambda_0 f}{2v} = 0.699^\circ = 0.012\text{rd}$$

4. Izračunajte povprečno svetlobno moč $P_s=?$, ki vpada na fotokatodo fotopomnoževalke s kvantnim izkoristkom $\eta=20\%$ pri valovni dolžini $\lambda=514\text{nm}$. Zahtevamo pogostnost napak $P_n=1.E-6$ pri zmogljivosti zveze $C=100\text{kbit/s}$. Ojačenje fotopomnoževalke je zelo visoko, temni tok je zanemarljiv. V sporočilu je v povprečju 50% enic in 50% ničel.

($h=6.624E-34\text{Js}$, $c=3E+8\text{m/s}$, $q_e=-1.6E-19\text{As}$, $k_b=1.38E-23\text{J/K}$)

$$P(m) = N^m \frac{e^{-N}}{m!} \quad N_f = \frac{N_e}{\eta} = 69 \quad f = \frac{c_0}{\lambda} = 583.7\text{THz}$$

$$P(0) = P_n = e^{-N}$$

$$N_e = -\ln P_n = 13.8$$

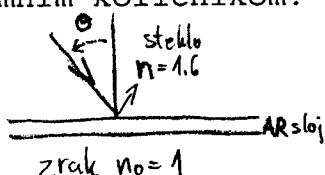
$$P_s = \frac{1}{2} C N_f h f = 1.33\text{pW} = -88.8\text{dBm}$$

5. Na izhodu polarizacijsko-neodvisnega polprevodniškega svetlobnega ojačevalnika izmerimo jakost šuma spontanega sevanja $P_{ase}=0.5\text{mW}$. Kolikšno je ojačenje ojačevalnika $G=?$ (v decibelih) na valovni dolžini $\lambda=1550\text{nm}$, če znaša pasovna širina ojačevalnika $\Delta\lambda=70\text{nm}$? Privzamemo popolno obratno naseljenost $u=1$. ($h=6.624E-34\text{Js}$, $c=3E+8\text{m/s}$)

$$P_{ase} \approx 2 \mu (G-1) h f \Delta f \approx 2 \mu G h f \Delta f \rightarrow G = \frac{P_{ase}}{2 \mu h f \Delta f} = 223 = 23.5\text{dB}$$

$$\text{obe polarizaciji} \quad f = \frac{c_0}{\lambda} = 193.5\text{THz} \quad \Delta f = \frac{c_0}{\lambda^2} \Delta \lambda = 2.741\text{THz}$$

1. Izračunajte mejni kot popolnega odboja $\theta = ?$ v steklu, pri izstopu svetlobe v zrak. Na površino stekla z lomnim količnikom $n=1.6$ je nanešen antirefleksni sloj debeline četrta valovne dolžine (za pravokotni vpad valovanja) in primernim lomnim količnikom. ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$ v zraku)



$$\theta = \arcsin\left(\frac{1}{n}\right) = 38.68^\circ = 0.675 \text{ rad}$$

Popolni odboj ni odvisen od poka n (AR sloja)!

2. Teflonsko palico ($\epsilon_r = 2.2$) želimo uporabiti kot mikrovalovni valovod pri frekvenci $f = 10 \text{ GHz}$. Kolikšen naj bo premer palice $2r = ?$, če se palica nahaja v praznem prostoru in zahtevamo enorodovno delovanje? ($c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$)

$$V = k_0 r \text{ NA} = \frac{\omega}{c_0} r \sqrt{n^2 - 1} = \frac{2\pi f}{c_0} r \sqrt{\epsilon_r - 1} = 2.405$$

$$2r = \frac{2.405 c_0}{\pi f \sqrt{\epsilon_r - 1}} = 21 \text{ mm}$$

3. Polprevodniški laser niha na osrednji valovni dolžini $\lambda = 1550 \text{ nm}$, izmerjena širina spektra svetlobe pa znaša $\Delta \lambda = 0.0003 \text{ nm}$. Na koliko različnih vzdolžnih rodovih $N = ?$ niha laser, če znaša dolžina čipa $l = 0.5 \text{ mm}$ in je povprečni lomni količnik polprevodnika $n = 3.7$? ($c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$)

$$\Delta f_{\text{spektra}} = \frac{\Delta \lambda c_0}{\lambda^2} = 37.5 \text{ MHz}$$

$$\Delta f_{\text{rodov}} = \frac{c_0}{2ln} = 81 \text{ GHz} \gg \Delta f_{\text{spektra}} \rightarrow \text{Enorodovni laser } \underline{N=1}$$

4. PIN-FET modul vsebuje fotodiodo s kvantnim izkoristkom $\eta = 0.7$ in temnim tokom $I_t = 10 \mu\text{A}$ pri valovni dolžini $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$. Fotodiodi sledi transimpedančni ojačevalnik z $R_t = 10 \text{ kohm}$. Izračunajte izhodno napetost $U = ?$, ko na vhod modula privedemo svetlobni signal moči $P_0 = -20 \text{ dBm}$! ($h = 6.624 \times 10^{-34} \text{ Js}$, $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$, $q_e = -1.6 \times 10^{-19} \text{ As}$) $P_0 = -20 \text{ dBm} = 10 \mu\text{W}$

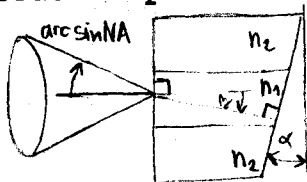
$$I_f = \frac{P_0 \eta |q_e|}{h f} = \frac{P_0 \eta |q_e| \lambda}{h c_0} = 4.3 \mu\text{A}$$

$$U = R_t (I_f + I_t) = 173 \text{ mV}$$

5. Izračunajte domet optične zveze $d = ?$, ki ga omejuje razširitev impulzov zaradi barvne disperzije enorodovnega vlakna! Koeficient barvne disperzije znaša $D = 5 \text{ ps/(nm.km)}$. Oddajnik vsebuje neposredno moduliran FP laser s svetlobno pasovno širino $\Delta f = 400 \text{ GHz}$ pri osrednji frekvenci $f = 194 \text{ THz}$. Razširitev impulzov ne sme preseči ene tretjine trajanja bita pri prenosni zmogljivosti $C = 622 \text{ Mbit/s}$. ($c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$)

$$\Delta t = \frac{1}{3C} = 536 \text{ ps} \quad \Delta \lambda = \Delta f \frac{c_0}{f^2} = 3.19 \text{ nm} \quad d = \frac{\Delta t}{D \Delta \lambda} = 33.6 \text{ km}$$

1. Izračunajte kot $\alpha = ?$, pod katerim moramo izbrusiti ferulo konektorja z vgrajenim mnogorodovnim svetlobnim vlaknom, da odbita svetloba ni več vodena v vlaknu. Vlakno ima zunanji premer $2r=125\mu\text{m}$, premer jedra $2r_j=50\mu\text{m}$, numerično aperturo $NA=0.2$ in lomni količnik jedra $n_1=1.463$. Kot α merimo glede na pravokoten rez (0 stopinj).



$$\alpha = \theta_c = \arcsin\left(\frac{NA}{n_1}\right) = 7.86^\circ = 0.137\text{rd}$$

2. Enorodovno svetlobno vlakno ima efektivno površino jedra $A=70\mu\text{m}^2$ in slabljenje $\alpha=0.2\text{dB/km}$ pri valovni dolžini $\lambda=1550\text{nm}$. Izračunajte dodatni nelinearni fazni zasuk $\phi = ?$ v vlaknu dolžine $l=20\text{km}$, če znaša nelinearni koeficient lomnega količnika stekla $n_2=3.2\text{E-}20\text{m}^2/\text{W}$! Vstopna svetlobna moč v vlakno je $P_0=100\text{mW}$ in z razdaljo upada zaradi slabljenja vlakna.

$$P = P_0 e^{-\alpha z} = P_0 e^{-\frac{\alpha z}{10} \ln 10}$$

$$\phi = \int_0^l d\phi = \int_0^l P_0 e^{-\frac{\alpha z}{10} \ln 10} \frac{n_2}{A} \frac{2\pi}{\lambda_0} dz = \frac{10 P_0 n_2 2\pi}{\alpha \ln 10 A \lambda_0} e^{-\frac{\alpha z}{10} \ln 10} \Big|_0^l$$

$$d\phi = \Delta k dz = \Delta n \frac{2\pi}{\lambda_0} dz = \frac{P}{A} n_2 \frac{2\pi}{\lambda_0} dz \quad \phi = \frac{20\pi P_0 n_2}{\alpha A \lambda_0 \ln 10} \left(1 - e^{-\frac{\alpha l}{10} \ln 10}\right) = 2.42\text{rd} = 139^\circ$$

3. Polprevodniški FP laser niha na $N=11$ rodovih pri osrednji valovni dolžini $\lambda=1310\text{nm}$. Izračunajte vzdolžno koherentno dolžino $d = ?$ laserske svetlobe, če znaša dolžina rezonatorja $l=350\mu\text{m}$ v polprevodniku z lomnim količnikom $n=3.7$! Vsi rodovi imajo enako prečno porazdelitev polja (en sam prečni rod). ($c=3\text{E}+8\text{m/s}$)

$$\Delta f \approx \frac{c_0}{2ln} N = 1.274\text{THz}$$

$$d = \frac{c_0}{\Delta f} = 236\mu\text{m} = 0.236\text{mm}$$

4. Fotopomnoževalka ima fotokatodo s kvantnim izkoristkom $\eta=0.2$ pri valovni dolžini $\lambda=700\text{nm}$ in $N=10$ množilnih elektrod, od katerih vsak pomnoži tok elektronov s faktorjem $M=5$. Koliko fotonov $N_f = ?$ mora vsebovati svetlobni paket z valovno dolžino $\lambda=700\text{nm}$, da ga fotopomnoževalka zazna z verjetnostjo vsaj $P=90\%$? ($Q_e=-1.6\text{E-}19\text{As}$, $h=6.624\text{E-}34\text{Js}$)

$$P(m) = N_e^m \frac{e^{-N_e}}{m!}$$

$$N_e = -\ln(1-P)$$

$$G = M^N = 9.77 \cdot 10^6 \gg 1$$

$$P(0) = e^{-N_e} = 1 - P$$

$$N_f = \frac{N_e}{\eta} = -\frac{\ln(1-P)}{\eta} = 11.5 \rightarrow 12 \text{ fotonov}$$

5. Polprevodniški svetlobni ojačevalnik ima $G=15\text{dB}$ ojačenja v pasu širine $\Delta\lambda=60\text{nm}$ okoli osrednje valovne dolžine $\lambda=1550\text{nm}$. Izračunajte moč ASE $P_{\text{ASE}} = ?$ (v dBm) na izhodu ojačevalnika na obeh polarizacijah, če znaša faktor inverzne naseljenosti $u=1.5$ ter sklopni izkoristek vhodnega in izhodnega vlakna $\eta=50\%$! Ojačenje je merjeno od vlakna do vlakna, ojačevalnik je izdelan kot polarizacijsko neodvisen. ($h=6.624\text{E-}34\text{Js}$, $c=3\text{E}+8\text{m/s}$)

$$G = 15\text{dB} = 31.6$$

$$P_{\text{ASE}} = 2\eta \mu (G-1) h f \Delta f = 2\eta \mu (G-1) h \left(\frac{c_0}{\lambda_0}\right) \frac{c_0}{\lambda_0^2} \Delta\lambda = 0.18\text{mW} = -7.43\text{dBm}$$

$$G' = \frac{G}{\eta^2} = 126.5$$

1. Svetlobni žarek vpada iz praznega prostora na prozorno snov pod kotom $\theta = 60^\circ$. Izračunajte odbojnost snovi za TE polarizacijo $\Gamma_{TE} = ?$ v navedenih pogojih, če TM odboj pri danem vpadnem kotu izgine? Izgube v snovi so zanemarljivo majhne.

$$\Gamma_{TM} = 0 \rightarrow \theta = \theta_{\text{Brewster}} \quad \Gamma_{TE} = \frac{\cos\theta - \sqrt{n^2 - \sin^2\theta}}{\cos\theta + \sqrt{n^2 - \sin^2\theta}} = \frac{0,5 - \sqrt{3 - \frac{3}{4}}}{0,5 + \sqrt{3 - \frac{3}{4}}} =$$

$$n = \tan\theta_{\text{Brewster}} = 1,732 \quad \rightarrow \frac{0,5 - 1,5}{0,5 + 1,5} = \frac{-1}{2} = -0,5$$

2. Dvolomno PANDA vlakno ima utripno dolžino $\Lambda = 3\text{mm}$, ko fazni zasuk doseže 2π med hitrim in počasnim rodом. Izračunajte potrebno dolžino vlakna $l = ?$, da z njim naredimo iz enega svetlobnega impulza dva impulza z medsebojno pravokotno polarizacijo in časovnim razmikom $t = 100\text{ps}$ pri valovni dolžini $\lambda = 1550\text{nm}$! ($c = 3 \times 10^8\text{m/s}$)

$$\frac{l}{\Lambda} = \frac{t}{T} = \frac{t}{\lambda/c} \rightarrow l = \frac{\Lambda t c}{\lambda} = 58\text{m}$$

3. Izračunajte število fotonov $N = ?$ znotraj HeNe laserske cevi z izhodno močjo $P = 1\text{mW}$ na valovni dolžini $\lambda = 633\text{nm}$. Izhodno zrcalo prepušča 4% vpadne svetlobe, drugo zrcalo pa odbije praktično vso vpadno svetlobo. Dolžina cevi znaša $l = 20\text{cm}$, ojačenje (prirastek števila fotonov) pa poenostavimo enakomerno razporejeno po celi dolžini cevi v obeh smereh. ($h = 6.624 \times 10^{-34}\text{Js}$)

$$W = \langle P_r \rangle \Delta t = \langle P_r \rangle \frac{2l}{c} \approx 3,267 \cdot 10^{-14}\text{J} \quad N = \frac{W}{hf} = \frac{W\lambda}{hc} \approx 1,04 \cdot 10^8$$

$$\langle P_r \rangle \approx \frac{1}{2} \left(\frac{P}{0,04} + \frac{P}{0,04} \cdot (1 - 0,04) \right) = \frac{1,96}{0,08} P = 24,5\text{mW}$$

4. Enopolarizacijski izolator za valovno dolžino $\lambda = 1550\text{nm}$ sestavljajo polarizator, ferit in še en polarizator. Določite vstavitevno slabljenje $a_1 = ?$ in povratno slabljenje $a_2 = ?$ takšnega izolatorja (v dB!), če zaradi netočnosti enosmernega magnetnega polja Faraday-ev pojav odstopa za $\Delta\phi = 3^\circ$ od nazivne vrednosti 45° ! Vse ostale izgube zanemarimo!

$$a_1 = -20 \log_{10}(\cos \Delta\phi) = 0,012\text{dB}$$

$$a_2 = -20 \log_{10}(\sin \Delta\phi) = 25,6\text{dB}$$

5. Sistem valvnodolžinskega multipleksa uporablja pas valovnih dolžin od $\lambda_1 = 1530\text{nm}$ do $\lambda_2 = 1570\text{nm}$. Sprejemnik vsebuje valvnodolžinsko kretnico, da vsak kanal pride do svoje fotodiode s kvantni izkoristok $\eta = 70\%$ in transimpedančnim ojačevalnikom z $R_t = 1\text{k}\Omega$. Kolikšna naj bo moč svetlobnih signalov na obeh koncih pasu $P_1 = ?$ in $P_2 = ?$, če je moč signala osrednjega kanala na $\lambda_3 = 1550\text{nm}$ enaka $P_3 = 10\mu\text{W}$ in želimo vse električne signale na izhodih enako močne? ($q = 1,6 \times 10^{-19}\text{As}$)

$$V = I R_t = \eta \frac{q \lambda}{h c_0} P R_t \rightarrow V_1 = V_2 = V_3 \quad P_1 = P_3 \frac{\lambda_3}{\lambda_1} = 10,13\mu\text{W}$$

$$P_1 \lambda_1 = P_2 \lambda_2 = P_3 \lambda_3 \quad P_2 = P_3 \frac{\lambda_3}{\lambda_2} = 9,87\mu\text{W}$$

1. Steklena ploščica debeline $d=2\text{mm}$ z lomnim količnikom $n=1.67$ deluje kot dielektrični valovod. Okolice ploščice je prazen prostor. V valovodu se širi vidna svetloba z valovno dolžino $\lambda=550\text{nm}$. Kolikšna mora biti najmanjša spektralna širina vira $\Delta\lambda$, da v valovodu ne opazimo rodov, da so torej možni vsi vpadni koti žarkov od meje popolnega odboja do pravega kota? ($c=3\text{E}+8\text{m/s}$)

$$NA = \sqrt{n^2 - 1} = 1.337 \quad \boxed{\Delta V = \pi} \quad \frac{\Delta \lambda}{\lambda_0} = \frac{\Delta V}{V} \rightarrow \Delta \lambda = \lambda_0 \frac{\Delta V}{V}$$

$$V = k_0 d NA = \frac{2\pi}{\lambda_0} d NA \rightarrow \Delta \lambda = \frac{\lambda_0^2}{2d NA} = \frac{(550 \cdot 10^{-9} \text{m})^2}{2 \cdot 2 \cdot 10^{-3} \text{m} \cdot 1.337} = 5.65 \cdot 10^{-11} \text{m} = 0.0565 \text{nm}$$

2. Enorodovno svetlobno vlakno ima pri valovni dolžini $\lambda=1300\text{nm}$ slabljenje $a=0.35\text{dB/km}$. Kolikšno je slabljenje istega vlakna a' pri valovni dolžini $\lambda'=900\text{nm}$ za osnovni rod ob predpostavki, da je v obeh primerih poglavitni izvor izgub Rayleigh-ovo sipanje svetlobe na nehomogenostih v jedru vlakna? Slabljenje molekularnih resonanc stekla in nečistoč zanemarimo!

$$a' = a \left(\frac{\lambda}{\lambda'} \right)^4 = 0.35 \text{dB/km} \left(\frac{1300 \text{nm}}{900 \text{nm}} \right)^4 = 1.524 \text{dB/km}$$

3. Izračunajte kvaliteto $Q=?$ FP rezonatorja polprevodniškega laserja dolžine $l=500\mu\text{m}$ pri valovni dolžini $\lambda=1310\text{nm}$ (v praznem prostoru). Jedro rezonatorja ima povprečni lomni količnik $n=3.7$. Glavnino izgub predstavljata oba Fresnel-ova odboja na obeh koncih rezonatorja, kjer svetloba uhaja v prazen prostor. ($c=3\text{E}+8\text{m/s}$)

$$Q = \omega \frac{W_{\text{rez}}}{P_{\text{izgub}}} \quad W_{\text{rez}} = 2SA_{\text{eff}} \Delta t = 2SA_{\text{eff}} \frac{l}{c_0 n} \quad Q = \frac{\omega l n}{c_0 (1 - |r|^2)} = \frac{2\pi l n}{\lambda_0 (1 - |r|^2)}$$

$$P_{\text{izgub}} = 2(1 - |r|^2) SA_{\text{eff}} \quad Q = 1.32 \cdot 10^4$$

$$\omega = 2\pi \frac{c_0}{\lambda_0} = 1.439 \cdot 10^{15} \text{rd/s} \quad |r| = \frac{n-1}{n+1} = 0.574$$

4. Izračunajte domet $d=?$ visokozmogljive zveze $C=40\text{Gbit/s}$ po NZDSF vlaknu z nekompenzirano barvno disperzijo $D=+7\text{ps/nm.km}$. Zveza uporablja DFB laser z zelo ozko spektrano črto $\Delta f=5\text{MHz}$ na valovni dolžini $\lambda=1560\text{nm}$ in zunanji elektrooptični amplitudni modulator. Popačenje impulzov zaradi polarizacijske disperzije zanemarimo.

$$\Delta t = D l \Delta \lambda = \frac{1}{C} \rightarrow l = \frac{1}{D \Delta \lambda C} = \frac{c_0}{D \lambda_0^2 C (C + \Delta f)} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{m/s} \cdot \text{nm} \cdot \text{km} \cdot \text{s} \cdot \text{s}}{7 \text{ps} \cdot 1560 \text{nm} \cdot 1.56 \cdot 10^6 \cdot 40 \cdot 10^9 \cdot 40,005 \cdot 10^3}$$

$$\frac{\Delta \lambda}{\lambda_0} = \frac{B}{f_0} = \frac{C + \Delta f}{c_0 / \lambda_0} \rightarrow \Delta \lambda = \frac{\lambda_0^2 (C + \Delta f)}{c_0} \quad l = 11.005 \text{km}$$

5. Svetlobni impulz, ki prileti na fotokatodo fotopomnoževalke s kvantnim izkoristkom $\eta=0.2$, vsebuje v povprečju $N_f=50$ fotonov valovne dolžine $\lambda=633\text{nm}$. Izračunajte verjetnost $P=?$, da impulz izbiye manj kot $m=3$ (torej $m=0, 1$ ali 2) fotoelektrone! ($c=3\text{E}+8\text{m/s}$, $h=6.624\text{E}-34\text{Js}$, $Q_e=-1.6\text{E}-19\text{As}$)

$$N = N_f \cdot \eta = 10 \quad P(0) = 4.54 \cdot 10^{-5} \quad P = P(0) + P(1) + P(2) = 2.769 \cdot 10^{-3} = 0.2769\%$$

$$P(m) = N^m \frac{e^{-N}}{m!} \quad P(1) = 4.54 \cdot 10^{-4} \quad P(2) = 2.27 \cdot 10^{-3}$$

1. Žarek nepolarizirane sončne svetlobe z gostoto moči $S_v = 1 \text{ kW/m}^2$ vpada iz praznega prostora na gladino prozorne tekočine z lomnim količnikom $n = 1.33$. Izračunajte gostoto moči odbitega žarka $S_o = ?$, če je vpadni kot takšen, da je odbiti žarek popolnoma linearno polariziran!

$$\Theta_B = \arctan n = 53.1^\circ \quad S_o = \frac{1}{2} S_v |\Gamma_{TE}|^2 = 38.6 \text{ W/m}^2$$

$$\Gamma_{TE} = \frac{\cos \Theta - \sqrt{n^2 - \sin^2 \Theta}}{\cos \Theta + \sqrt{n^2 - \sin^2 \Theta}} = -0.278 \quad \text{samo TE}$$

2. Stakleno ploščico z lomnim količnikom $n = 1.6$ in debelino $d = 3 \text{ mm}$ 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 $\lambda = 514 \text{ nm}$, dolžina ploščice $l = 1 \text{ m}$. ($c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$)

$$t_1 = \frac{l}{c_0} n \quad \Delta t = t_2 - t_1 = \frac{l}{c_0} n(n-1) = 3.2 \cdot 10^{-9} \text{ s} = 3.2 \text{ ns}$$

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

3. Polprevodniški laser ima izmerjen pragovni tok $I_{p1} = 10 \text{ mA}$ pri temperaturi $T_1 = 0^\circ \text{C}$, potem $I_{p2} = 12 \text{ mA}$ pri temperaturi $T_2 = 25^\circ \text{C}$ in se $I_{p3} = 15 \text{ mA}$ pri temperaturi $T_3 = 50^\circ \text{C}$. Izračunajte pragovni tok laserja pri temperaturi $T = 35^\circ \text{C}$, če predpostavimo, da je krivulja temperaturne odvisnosti pragovnega toka parabola!

$$I_p = aT^2 + bT + c \quad \begin{cases} 10 = a \cdot 0 + b \cdot 0 + c \\ 12 = a \cdot 25 + b \cdot 25 + c \\ 15 = a \cdot 50 + b \cdot 50 + c \end{cases} \rightarrow \begin{cases} c = 10 \\ 2 = 625a + 25b \quad (-2) \\ 5 = 2500a + 50b \end{cases} \rightarrow \begin{cases} 5 = \frac{2500}{1250} + 50b \rightarrow b = \frac{3}{50} \\ I_p = \frac{1}{1250} T^2 + \frac{3}{50} T + 10 \end{cases}$$

$$I_p(35^\circ \text{C}) = 13.08 \text{ mA}$$

4. Vlakenska zveza z zmogljivostjo $C = 10 \text{ Gbit/s}$ ima oddajnik povprečne moči $P_o = 10 \text{ mW}$. Slabljenje zveze znaša $\alpha = 26 \text{ dB}$ pri valovni dolžini $\lambda = 1532 \text{ nm}$. 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 $M = 20$? ($c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$, $h = 6.624 \times 10^{-34} \text{ Js}$, $q_e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ As}$)

$$N_{f0} = \frac{W}{hf} = \frac{P_o T}{h \frac{c_0}{\lambda}} = \frac{P_o \lambda}{Chc_0} = 7.71 \cdot 10^6 \quad N_f = \frac{N_{f0}}{\alpha} = 19300$$

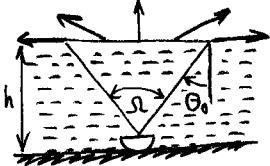
$$N_e = N_f \cdot \eta \cdot M = 270000$$

5. Enorodovno vlakno ima koeficient barvne disperzije $D_{barvna} = 17 \text{ ps/(nm.km)}$ in koeficient polarizacijske rodovne disperzije $D_{pmd} = 0.5 \text{ ps/sqrt(km)}$. Pri kateri dolžini vlakna $l = ?$ bosta učinka obeh disperzij enako velika, če znaša pasovna širina vira $\Delta \lambda = 0.3 \text{ nm}$? Kolikša je tedaj skupna razširitev impulza $\Delta t = ?$

$$\Delta t_b = D_{barvna} \cdot \Delta \lambda \cdot l \quad \Delta t_b = \Delta t_p \rightarrow D_{barvna} \Delta \lambda \cdot l = D_{pmd} \sqrt{l} \rightarrow l = \left(\frac{D_{pmd}}{D_{barvna} \Delta \lambda} \right)^2 = 0.0096 \text{ km} = 9.6 \text{ m}$$

$$\Delta t_p = D_{pmd} \cdot \sqrt{l} \quad \Delta t = \Delta t_b + \Delta t_p = D_{barvna} \Delta \lambda l + D_{pmd} \sqrt{l} = 0.098 \text{ ps} = 98 \text{ fs}$$

1. Okrasna svetilka se nahaja na dnu bazena, ki je napolnjen z vodo z lomnim količnikom $n=1.33$ do višine $h=1.2\text{m}$ nad dnom. Izračunajte prostorski kot sevanja svetilke $\Omega=?$ v vodi, da svetlobo vidi opazovalec nad vodno gladino.



$$\theta_0 = \arcsin\left(\frac{1}{n}\right) ; \cos \theta_0 = \sqrt{1 - \sin^2 \theta_0} = \sqrt{1 - \left(\frac{1}{n}\right)^2}$$

$$\Omega = 2\pi (1 - \cos \theta_0) = 2\pi \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1}{n}\right)^2}\right) = \underline{\underline{2.14 \text{ srad}}}$$

2. Enorodovno svetlobno vlakno s stopničastim lomnim likom, premerom jedra $2a=9\mu\text{m}$, mejno valovno dolžino $\lambda_{\text{dam}}=1270\text{nm}$ in oblogo iz čistega kremenovega stekla $n_2=1.46$ uporabimo za prenos vidne rdeče svetlobe z valovno dolžino $\lambda=650\text{nm}$. Določite razširitev impulzov $\Delta t=?$ v vlaknu dolžine $l=1\text{km}$! ($c=3\text{E}+8\text{m/s}$)

$$n_1 = \sqrt{NA^2 + n_2^2} = \underline{\underline{1.46399}}$$

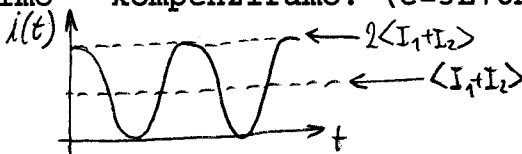
$$V = 2.405 = k_0 a NA$$

$$NA = \frac{2.405 \lambda_m}{2\pi a} = \underline{\underline{0.108}}$$

$$\Delta t = \frac{l n_1}{c_0} \left(\frac{n_1}{n_2} - 1\right) = \underline{\underline{1.33 \cdot 10^{-8} \text{ s} = 13.3 \text{ ns}}}$$

3. Polarizirani HeNe laser niha na dveh sosednjih rodovih z razliko frekvenc $\Delta f=620\text{MHz}$. Izhodna moč je na obeh rodovih enaka $P_1=P_2=1\text{mW}$ pri osrednji valovni dolžini $\lambda=633\text{nm}$. Izračunajte električno moč $P=?$ (v dBm) za radijski spektralni analizator z vhodno impedanco $Z=50\Omega$, krmiljen s silicijevo fotodiode s kvantnim izkoristkom $\eta=70\%$. Kapacitivnost fotodiode zanemarimo - kompenziramo. ($c=3\text{E}+8\text{m/s}$, $h=6.624\text{E}-34\text{Js}$, $q_e=-1.6\text{E}-19\text{As}$)

$$\frac{I_e}{P_0} = \frac{\eta |q_e|}{h f} = \frac{\eta |q_e| \lambda}{h c_0} = \underline{\underline{0.357 \text{ A/W}}}$$



$$P_e = \frac{1}{2} I^2 Z = \frac{1}{2} (I_1 + I_2)^2 Z = 2 \left[P_1 \left(\frac{I_e}{P_0} \right) \right]^2 Z = \underline{\underline{12.7 \mu\text{W} = -18.95 \text{ dBm}}}$$

4. PIN-FET sprejemnik ima vgrajeno fotodiode s kvantnim izkoristkom $\eta=70\%$ pri valovni dolžini $\lambda_{d1}=1300\text{nm}$, kjer za predpisano pogostnost napak doseže občutljivost $P_1=-38\text{dBm}$. Izračunajte občutljivost $P_2=?$ (v dBm) pri valovni dolžini $\lambda_{d2}=1550\text{nm}$, če tam kvantni izkoristek fotodiode upade na $\eta_2=50\%$! ($c=3\text{E}+8\text{m/s}$, $h=6.624\text{E}-34\text{Js}$, $q_e=-1.6\text{E}-19\text{As}$)

$$P_1 = -38 \text{ dBm} = \underline{\underline{158 \text{ nW}}}$$

$$P_2 = P_1 \frac{\eta_1 \lambda_1}{\eta_2 \lambda_2} = \underline{\underline{186 \text{ nW} = -37.3 \text{ dBm}}}$$

5. Barvno disperzijo merimo tako, da svetlobni oddajnik moduliramo s sinusnim signalom frekvence $f=1\text{GHz}$ ter merimo spremembo faze modulacije kot funkcijo valovne dolžine. Kolikšen je koeficient barvne disperzije $D=?$ za vzorec vlakna dolžine $l=30\text{km}$, če fazni zasuk doseže $\phi=2\text{PI}$ pri spremembi valovne dolžine iz $\lambda_{d1}=1550\text{nm}$ na $\lambda_{d2}=1552\text{nm}$?

$$\Delta t = \frac{\phi}{\omega} = \frac{\phi}{2\pi f} = \underline{\underline{1 \text{ ns}}}$$

$$D = \frac{\Delta t}{l(\lambda_2 - \lambda_1)} = \underline{\underline{16.7 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})}}$$

1. Mnogorodovno vlakno ima zelo debelo jedro s polmerom $a=1\text{mm}$ in lomnim količnikom $n_1=1.6$. Izračunajte vdorno globino valovanja Δ ? (razdalja na kateri pade jakost polja na $1/e$) v oblogi z lomnim količnikom $n_2=1.4$, če v vlaknu vzbudimo le osnovni rod (žarek v smeri osi vlakna) s frekvenco $f=474\text{THz}$! ($c=3\text{E}+8\text{m/s}$)

$$k_1 = n_1 \frac{2\pi f}{c} = 1,588 \cdot 10^7 \text{rd/m} = \beta_z \quad \vec{k}_1 = \vec{k}_2 \quad a \gg \lambda \rightarrow (x, y, z)$$

$$k_2 = n_2 \frac{2\pi f}{c} = 1,39 \cdot 10^7 \text{rd/m} \quad |\vec{k}_{2x}| = \sqrt{\beta_z^2 - k_2^2} = 7,69 \cdot 10^6 \text{rd/m} \quad \delta = \frac{1}{|\vec{k}_{2x}|} = 130 \text{nm}$$

$$\vec{k}_2 = \vec{k}_x k_x + \vec{k}_z k_z; E_2 = C e^{-|\vec{k}_{2x}|x} e^{-j\beta_z z}$$

2. Enorodovno svetlobno vlakno ima pri valovni dolžini $\lambda=980\text{nm}$ (v praznem prostoru) slabljenje $\alpha=1.3\text{dB/km}$, 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 HE_{11} ?

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

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

3. Elektro-optični Mach-Zehnder modulator na osnovi GaAs je vgrajen v čip DFB laserja in ima $U_{pi}=1.8\text{V}$. Določite potrebno izhodno moč $P=?$ (v dBm) električnega krmilnega ojačevalnika, ki popolnoma izkrmili elektro-optični modulator (največje ugasno razmerje) z električnim signalom pravokotne oblike! Vsi električni priključki so prilagojeni na karakteristično impedanco $Z_k=50\Omega$. Enosmerno delovno točko modulatorja nastavimo z ločeno elektrodo.

$$P = \frac{U^2}{Z_k} = \frac{U_{pi}^2}{4Z_k} = 16.2 \text{mW} \quad P_{\text{dBm}} = 10 \log_{10} \left(\frac{P}{1 \text{mW}} \right) = 12.1 \text{dBm}$$

$$U = \frac{1}{2} U_{pi}$$

4. Izračunajte električni tok $I=?$ skozi silicijevo PIN fotodiodo, če do zaporne plasti fotodiode pride svetlobna moč $P=-15\text{dBm}$ na frekvenci $f=194\text{THz}$! Izgube svetlobe zaradi odboja na površini čipa in absorpcije v ostalih plasteh polprevodniške diode zanemarimo. Na priključke fotodiode privedemo dovolj visoko zaporno napetost, da izkoristimo vse nastale pare elektron-vrzel v zaporni plasti. ($c=3\text{E}+8\text{m/s}$, $h=6.624\text{E}-34\text{Js}$, $q_e=-1.6\text{E}-19\text{As}$)

$$\lambda_0 = \frac{c}{f} = 1546 \text{nm} \longrightarrow \underline{I=0}$$

Si ima prevelik

prepovedani energijski pas $\rightarrow$ slep $\lambda > 1,2 \mu\text{m}$

5. DFB laser na valovni dolžini $\lambda=1560\text{nm}$ priključimo preko izolatorja in elektro-absorpcijski amplitudni modulator. Na slednjega pripeljemo tudi analogni (radijski) signal z nosilno frekvenco $f=60\text{GHz}$. Kolikšna sme biti dolžina prenosnega vlakna $l=?$ z disperzijskim koeficientom $D=17\text{ps/nm.km}$, da fazni zasuk bočnih pasov ne preseže vrednosti $\phi=30\text{stopinj}$ glede na optični nosilec? ($c=3\text{E}+8\text{m/s}$)

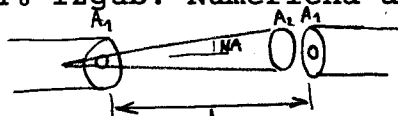
$$\Delta t = \frac{1}{f} \frac{\phi}{360^\circ} = 1,389 \text{ps} \quad \Delta \lambda = f \frac{\lambda^2}{c} = 0.487 \text{nm} \quad l = \frac{\Delta t}{D \Delta \lambda} = 0.168 \text{km} = 168 \text{m}$$

=====

1. Ravnina XY kartezičnega koordinatnega sistema predstavlja mejo dveh snovi z lomnima količnikoma $n_1=2.205$ in $n_2=?$. Žarek HeNe laserja s frekvenco $f=474\text{THz}$ vpada pod kotom $\theta=45^\circ$ iz snovi 1 na mejo. Izračunajte lomni količnik snovi $n_2=?$, če je Z-komponenta (pravokotna na mejo) valovnega vektorja v snovi 2 enaka 0 ($k_{2z}=0$)! ($c=3E+8\text{m/s}$)

$$\left. \begin{aligned} k_{1x}^2 + k_{1y}^2 + k_{1z}^2 &= k_1^2 = n_1^2 k_0^2 \\ k_{2x}^2 + k_{2y}^2 + 0 &= k_2^2 = n_2^2 k_0^2 \end{aligned} \right\} \begin{aligned} n_2^2 k_0^2 + k_{1z}^2 &= n_1^2 k_0^2 \rightarrow n_2^2 k_0^2 + n_1^2 k_0^2 \cos^2 \theta = n_1^2 k_0^2 \\ n_2^2 &= n_1^2 (1 - \cos^2 \theta) = n_1^2 \sin^2 \theta \\ n_2 &= n_1 \sin \theta = 2.205 \cdot 0.707 = \underline{1.559} \end{aligned}$$

2. Izračunajte vstavitveno slabljenje $a=?$ (v dB) med dvema koncema mnogorodovnih vlaken $50/125\mu\text{m}$ s stopničastim lomnim likom in enakomerno porazdelitvijo rodov. Oba konca vlaken sta pravilno odrezana pod pravim kotom, osi vlaken sta poravnani, razdalja med koncema znaša $d=1.5\text{mm}$. Odboja na mejah steklo/zrak in zrak steklo doprinese vsak še dodatne 4% izgub. Numerična apertura vlaken znaša $NA=0.2$.



$$a = 10 \log_{10} \left[\frac{A_1}{A_2} (1 - 0.04)^2 \right] = 10 \log_{10} \left[\left(\frac{25}{325} \right)^2 0.96^2 \right] = 20 \log_{10} \frac{0.96}{1.3} = \underline{-22.63\text{dB}}$$

$r_{\text{jedra}} = 25\mu\text{m}$ $A_1 = \pi r^2 = \pi 25^2 \mu\text{m}^2$ $A_2 = \pi (r + NA d)^2 = \pi (25 + 300)^2 \mu\text{m}^2$

3. Laser za vrtnanje zob oddaja povprečno svetlobno moč $P_0=10\text{W}$ na valovni dolžini $\lambda=2940\text{nm}$. Izračunajte toplotno moč $P_t=?$, ki se sprošča v paličastem kristalu Er-YAG, če laser črpamo s ksenonsko žarnico na osrednji valovni dolžini $\lambda_c=800\text{nm}$! Pri izračunu upoštevajte, da izkoristimo $\eta=80\%$ črpalnih fotonov. Neizkoriščena črpalka in vsi ostali energijski prehodi Er-YAG proizvajajo le toploto v kristalu. ($h=6.625E-34\text{Js}$, $c=3E+8\text{m/s}$)

$$P_t = P_c - P_0 = \frac{1}{\eta} \frac{W_c}{W_0} P_0 - P_0 = P_0 \left(\frac{W_c}{\eta W_0} - 1 \right) = P_0 \left(\frac{\lambda_0}{\eta \lambda_c} - 1 \right) = \underline{35.94\text{W}}$$

$$W_c = h f_c = \frac{h c_0}{\lambda_c} ; W_0 = \frac{h c_0}{\lambda_0}$$

4. Izračunajte povprečno svetlobno moč $\langle P_0 \rangle=?$ (v dBm) za PIN-FET modul pri hitrosti prenosa $C=2.5\text{Gbit/s}$ pri valovni dolžini $\lambda=1.55\mu\text{m}$! PIN fotodiode ima kvantni izkoristek $\eta=70\%$. Zrnat šum lahko zanemarimo. Skupna kapacitivnost vhoda znaša $C_d+C_0=0.5\text{pF}$. Toplotni šum ojačevalnika daje napetost $U_n=30\mu\text{Veff}$ preračunano na električni priključek fotodiode. Na izhodu sprejemnika zahtevamo razmerje $Q=10$. V povprečju sporočilo vsebuje polovico enic in polovico ničel. ($h=6.625E-34\text{Js}$, $q_e=-1.6E-19\text{As}$, $c=3E+8\text{m/s}$)

$$Q = \frac{\langle U_{s1} \rangle - \langle U_{s0} \rangle}{\sigma_1 + \sigma_0} = \frac{U_{s1}}{2U_n} \quad N_{e1} = \frac{U_{s1}(C_d+C_0)}{|q_e|} = \underline{1875}$$

$$U_{s1} = 2U_n Q = 600\mu\text{V} \quad \langle P_0 \rangle = \frac{N_{e1}}{2\eta} W_f C = \frac{N_{e1}}{2\eta} \frac{h c_0}{\lambda} C = 4.293 \cdot 10^{-7} \text{W} = \underline{-33.67\text{dBm}}$$

5. Podoceanski kabel dolžine $l=5000\text{km}$ uporablja svetlobne ojačevalnike v frekvenčnem pasu $f=194\text{THz}$ in valovnodolžinski multipleks (WDM) s kanalskim razmakom $\Delta f=100\text{GHz}$. Presluh med kanali izvira iz mešalnih produktov zaradi nelinearnosti stekla. Presluh skušamo zadušiti tako, da zanj zahtevamo fazno neusklajenost $\Delta\beta=-4\text{rd/km}$. Kolikšen mora biti koeficient barvne razpršitve $D=?$ (v ps/nm.km) uporabljenega svetlobnega vlakna? ($c=3E+8\text{m/s}$)

$$\Delta\beta = -\frac{2\pi\lambda^2}{c_0} \Delta f^2 D \rightarrow D = -\frac{\Delta\beta}{2\pi\lambda^2} \left(\frac{c}{\Delta f} \right)^2 = \frac{4\text{rd/km}}{2\pi \cdot 3 \cdot 10^8 \text{m/s}} \left(\frac{194}{0.1} \right)^2 = \underline{4.99 \frac{\text{ps}}{\text{nm.km}}}$$

1. Nepolariziran žarek svetlobe z valovno dolžino $\lambda = 514 \text{ nm}$ vpada iz zraka ($n=1$) pod pravim kotom na gladko površino velikega bloka dielektrika. Pri čem znaša moč vpadnega žarka $P_v = 25 \text{ mW}$ ter moč odbitega žarka $P_o = 10 \text{ mW}$. Kolikšna je relativna dielektričnost bloka $\epsilon_r = ?$ ($c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$)

$$P_o = P_v |r|^2 \rightarrow |r| = \sqrt{\frac{P_o}{P_v}} = 0.632 \quad n = \sqrt{\epsilon_r} \rightarrow \epsilon_r = n^2 = \underline{\underline{19.73}}$$

$$\theta = 0 \rightarrow |n_t| = |n_r| = \frac{n-1}{n+1} \rightarrow n = \frac{1+|r|}{1-|r|} = \underline{\underline{4.442}}$$

2. Določite parametre jedra vlakna: polmer jedra $a = ?$ in lomni količnik jedra $n_1 = ?$. Obloga vlakna je izdelana iz stekla z lomnim količnikom $n_2 = 1.483$. Zaželjena sta numerična apertura $NA = 0.15$ ter enorodovno delovanje za vidno rdečo svetlobo na valovni dolžini $\lambda = 650 \text{ nm}$. ($c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$)

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \rightarrow n_1 = \sqrt{NA^2 + n_2^2} = \underline{\underline{1.4906}}$$

$$V = NA k_0 a = 2.405 \rightarrow a = \frac{2.405 \lambda_0}{2\pi NA} = \underline{\underline{1.659 \mu\text{m}}}$$

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 $\lambda_{d1} = 1552 \text{ nm}$ nad pragovnim tokom $I_{p1} = 15 \text{ mA}$. Pri temperaturi $T_2 = 50^\circ\text{C}$ laser niha na valovni dolžini $\lambda_{d2} = 1556 \text{ nm}$ nad pragovnim tokom $I_{p2} = 25 \text{ mA}$. Kolikšen je pragovni tok $I_p = ?$ laserja pri valovni dolžini $\lambda = 1555 \text{ nm}$, če predpostavimo linearno odvisnost vseh veličin?

$$I_p = AT + B \xrightarrow{T=0^\circ\text{C}} B = 15 \text{ mA} \xrightarrow{T=50^\circ\text{C}} A = 0.2 \text{ mA/}^\circ\text{C}$$

$$T = \frac{\lambda - D}{C} = \underline{\underline{37.5^\circ\text{C}}}$$

$$\lambda = CT + D \xrightarrow{T=0^\circ\text{C}} D = 1552 \text{ nm} \xrightarrow{T=50^\circ\text{C}} C = 0.08 \text{ nm/}^\circ\text{C}$$

$$I_p = AT + B = \underline{\underline{22.5 \text{ mA}}}$$

4. Na elektroabsorpcijski modulator pripeljemo svetlobo laserja moči $P_v = 3 \text{ mW}$ na valovni dolžini $\lambda = 1540 \text{ nm}$. Enosmerno zaporno napetost na krmilni elektrodi modulatorja nastavimo tako, da znaša vstavitveno slabljenje modulatorja $a = 6 \text{ dB}$. Izračunajte tok krmilne elektrode $I = ?$, če se vsa absorbirana svetloba pretvori v nosilce elektrine v čipu modulatorja! Izgube svetlobe pri sklopu vlakna na čip zanemarimo. ($c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$, $h = 6.625 \times 10^{-34} \text{ Js}$, $q_e = -1.6 \times 10^{-19} \text{ As}$)

$$P_{\text{absorbirana}} = P_v \left(1 - \frac{1}{a}\right) = 0.75 P_v = \underline{\underline{2.25 \text{ mW}}}$$

$$a = 6 \text{ dB} = 4$$

$$I = \frac{P_{\text{absorbirana}} |q_e| \lambda}{h c_0} = \underline{\underline{2.49 \text{ mA}}}$$

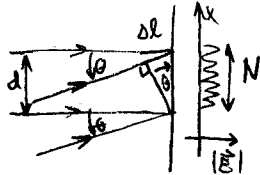
5. Izračunajte povečanje dometa delatl = ? (v kilometrih) merilnika OTDR, če povečamo širino svetlobnih impulzov iz $t_1 = 1 \mu\text{s}$ na $t_2 = 5 \mu\text{s}$! Laser merilnika deluje v obeh primerih z isto vršno močjo $P_o = 1 \text{ W}$ na valovni dolžini $\lambda = 1550 \text{ nm}$. Povprečno slabljenje optičnega kabla vključno s številnimi zvari znaša $a = 0.22 \text{ dB/km}$. ($c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$)

$$\Delta W_{\text{dB}} = 10 \log_{10} \frac{P_o t_2}{P_o t_1} = 7 \text{ dB} \quad \Delta l = \frac{\Delta W_{\text{dB}}}{2a} = \underline{\underline{15.9 \text{ km}}}$$

v obe smeri

=====

1. Michelson-ov interferometer deluje s kolimiranim žarkom HeNe laserja s premerom $d=1\text{cm}$ in valovno dolžino $\lambda=632.8\text{nm}$ v praznem prostoru. Na zaslonu vidimo v celotnem premeru žarka $N=17$ svetlih prog. Izračunajte vpadni kot merjenega žarka $\theta=?$, če je referenčni žarek točno pravokoten na zaslon!



$$\Delta l = N \cdot \lambda$$

$$\sin \theta = \frac{\Delta l}{d}$$

$$\theta = \arcsin \frac{N \cdot \lambda}{d} = \arcsin \frac{17 \cdot 632.8 \cdot 10^{-9} \text{m}}{10^{-2} \text{m}}$$

$$\theta = 0.001076 \text{rd} = 0.062^\circ = 3'42''$$

2. Mnogorodovno svetlobno vlakno 50/125um ima numerično aperturo $NA=0.2$ ter oblogo iz stekla z lomnim količnikom $n_2=1.463$. Izračunajte, v kakšem razponu se lahko giblje fazna konstanta $\beta_{\min}=?$ in $\beta_{\max}=?$ za vodeno valovanje z valovno dolžino $\lambda=1309\text{nm}$ v praznem prostoru? ($c=3\text{E}+8\text{m/s}$)

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

$$\beta_{\min} = n_2 \frac{2\pi}{\lambda_0} = 7.022 \cdot 10^6 \text{rd/m}$$

$$n_1 = \sqrt{n_2^2 + NA^2} = 1.477$$

$$\beta_{\max} = n_1 \frac{2\pi}{\lambda_0} = 7.088 \cdot 10^6 \text{rd/m}$$

3. HeNe laserska cev dolžine $l=200\text{mm}$ niha na enem samem rodu na frekvenci $f=474\text{THz}$. Izračunajte spremembo frekvence rdeče svetlobe $\Delta f=?$, če se zaradi segrevanja laserska cev podaljša za $\Delta l=50\text{nm}$ in pri tem še ne pride do preskoka na naslednji rod nihanja! ($c=3\text{E}+8\text{m/s}$, $n=1$ za plinsko zmes)

$$f = N \frac{c}{2l}$$

$$\Delta f = \frac{Nc}{2} \left[\frac{1}{l+\Delta l} - \frac{1}{l} \right] = \frac{Nc}{2} \cdot \frac{-\Delta l}{l(l+\Delta l)} = -f \frac{\Delta l}{l}$$

$$f + \Delta f = N \frac{c}{2(l+\Delta l)}$$

$$\Delta f = -118.5 \text{MHz}$$

4. Sprejemnik vsebuje fotodiodo iz polprevodnika z lomnim količnikom $n=3.8$, ki ni opremljena z antirefleksnim slojem na vstopni površini. Na vstopno ploskvico vпада žarek iz praznega prostora pod kotom $\theta=30^\circ$. V kakšem razponu Δ (v optičnih decibelih) se spreminja odzivnost sprejemnika, če spreminjamo polarizacijo vpadne svetlobe z valovno dolžino $\lambda=900\text{nm}$?

$$\Gamma_{TE} = \frac{\cos \theta - \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}}{\cos \theta + \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}} = -0.626$$

$$\Delta = 10 \log_{10} \frac{1 - |\Gamma_{TM}|^2}{1 - |\Gamma_{TE}|^2} = 0.684 \text{dB}$$

$$\Gamma_{TM} = \frac{n^2 \cos \theta - \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}}{n^2 \cos \theta + \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}} = 0.537$$

5. Erbijev vlakenski svetlobni ojačevalnik črpamo s svetlobo valovne dolžine $\lambda=980\text{nm}$ do popolne inverzne naseljenosti energijskih nivojev. Brez vhodnega signala daje ojačevalnik skupno svetlobno moč spontanega sevanja $P=20\text{mW}$ v pasu okoli $\lambda=1532\text{nm}$. Izračunajte koncentracijo erbijevih ionov v enoti volumna jedra $N=?$ ($/\text{m}^3$), če je ojačevalno vlakno dolgo $l=30\text{m}$ in znaša polmer dopiranega jedra $a=2\mu\text{m}$. Spontano sevanje preneha $t=9\text{ms}$ po izklopu črpalke. ($h=6.625\text{E}-34\text{Js}$)

$$W = Pt = N \pi a^2 l h f = N \pi a^2 l h \frac{c}{\lambda} \rightarrow N = \frac{Pt \lambda}{\pi a^2 l h c} = 3.68 \cdot 10^{24} / \text{m}^3$$

1. Staklena ploščica $n_1=1.5$ se obnaša kot planarni dielektrični valovod v zraku $n_2=1$. Debelina ploščice d je dosti večja od valove dolžine ($d \gg \lambda = 0.5 \mu\text{m}$), zato lahko ploščica vodi veliko število rodov. Izračunajte vdorno globino valovanja v zrak $\delta = ?$ (kjer upade polje na $1/e$), ki jo presega polovica vodenih rodov!

$$\begin{aligned} 2d \cos \theta_m &\approx 2\pi m \\ m &= \frac{d}{\lambda} \cos \theta_m \\ n &= \frac{m}{z} = \frac{d}{\lambda} \cos \theta_m \end{aligned} \quad \begin{aligned} \cos \theta_m &= \frac{1}{2} \cos \theta_m = \frac{1}{2} \sqrt{1 - \sin^2 \theta_m} = \frac{1}{2} \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2} = 0.373 \\ \beta_n &= k_0 n_1 \sin \theta_n = k_0 n_1 \sqrt{1 - \cos^2 \theta_n}; \quad k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0} \\ |k_{zx}| &= \sqrt{\beta_n^2 - k_0^2 n_2^2} = k_0 \sqrt{n_1^2 - n_2^2 \cos^2 \theta_n}; \quad \delta = \frac{1}{|k_{zx}|} = \frac{\lambda_0}{2\pi \sqrt{n_1^2 - n_2^2 \cos^2 \theta_n}} = 82.2 \text{ nm} \end{aligned}$$

2. Enorodovno svetlobno vlakno ima zaradi netočnosti pri izdelavi nekoliko ekscentrično jedro. Posledica mehanskih sil sta različna lomna količnika jedra za TE in TM polarizacijo: $n_{1TE}=1.4635724$ in $n_{1TM}=1.4635737$. Izračunajte dolžino vlakna, ko se slika poljubnega EM polja frekvence $f=194 \text{ THz}$ v jedru vlakna ponovi (utripna dolžina) $\Lambda = ?$ ($c=3 \times 10^8 \text{ m/s}$)

$$2\pi = (n_{1TM} - n_{1TE}) k_0 \Lambda = (n_{1TM} - n_{1TE}) \frac{2\pi}{\lambda_0} \Lambda$$

$$\Lambda = \frac{\lambda_0}{n_{1TM} - n_{1TE}} = \frac{c}{f(n_{1TM} - n_{1TE})} = 1.19 \text{ m}$$

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 $E_{\text{max}} = ?$ 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. ($c=3 \times 10^8 \text{ m/s}$, $Z_0=377 \text{ ohm}$, $n(\text{polprevodnik})=3.8$)

$$P = \int \vec{S} \cdot d\vec{A} \approx SA \quad A = h \cdot w$$

$$S = \frac{|E|^2}{2Z_0} = \frac{E_{\text{max}}^2}{2Z_0} \quad E_{\text{max}} = \sqrt{\frac{2Z_0 P}{hw}} = 709 \text{ kV/m}$$

4. Mach-Zehnder-jev modulator ima najnižje vstavitevno slabljenje $a_{\text{min}}=5 \text{ dB}$ brez krmilne napetosti na elektrodah. Slabljenje se monotonno poveča na $a=15 \text{ dB}$, ko krmilna napetosti naraste na $U=5 \text{ V}$. Izračunajte $U_{\pi} = ?$ modulatorja, če slabljenje merimo pri valovni dolžini $\lambda=1550 \text{ nm}$ in polarizaciji TE!

$$a = a_{\text{min}} - 10 \log_{10} \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos \pi \left(\frac{U}{U_{\pi}} \right) \right) \rightarrow \frac{1}{2} \left(1 + \cos \pi \left(\frac{U}{U_{\pi}} \right) \right) = 10^{\frac{a_{\text{min}} - a}{10}}$$

$$U_{\pi} = \frac{\pi U}{\arccos \left(2 \cdot 10^{\frac{a_{\text{min}} - a}{10}} - 1 \right)} = 6.288 \text{ V}$$

5. Sprejemnik vsebuje svetlobni predojačevalnik z Er^{3+} vlaknom in InGaAs fotodiodo s kvantnim izkoristkom $\eta=0.7$ pri valovni dolžini $\lambda=1550 \text{ nm}$. Izračunajte temni tok $I = ?$ v fotodiodi (tok brez vhodnega signala), če znaša ojačenje predojačevalnika $G=20 \text{ dB}$ in fotodioda ni občutljiva na polarizacijo svetlobe! Črpalka na $\lambda_{\text{p}}=980 \text{ nm}$ zagotavlja popolno inverzno naseljenost v ojačevalniku, ostale izgube lahko zanemarimo. ($h=6.625 \times 10^{-34} \text{ Js}$, $Q_e=-1.6 \times 10^{-19} \text{ As}$, $c=3 \times 10^8 \text{ m/s}$)

$$\Delta f = 4 \text{ THz} \quad G = 20 \text{ dB} = 100 \quad P_0 = 2 \mu (G-1) h f \Delta f = 101.6 \mu \text{ W}$$

$$\mu \approx 1$$

$$f = \frac{c}{\lambda} = 193.5 \text{ THz} \quad I_e = \frac{\eta P_0 / Q_e}{h f} = 88.7 \mu \text{ A}$$

1. Sončna svetloba vpada iz praznega prostora na vodno gladino ($n=1.33$) pod kotom $\theta=45^\circ$. Izračunajte osno razmerje $R=?$ (v dB) odbitega žarka! Polarizacijo svetlobe merimo z vrtljivo ploščico, ki prepušča linearno-polarizirano svetlobo.

$$\Gamma_{TE} = \frac{\cos\theta - \sqrt{n^2 - \sin^2\theta}}{\cos\theta + \sqrt{n^2 - \sin^2\theta}} = -0.229$$

$$R_{dB} = 20 \log \frac{|\Gamma_{TE}|}{|\Gamma_{TM}|} = 12.8 \text{ dB}$$

$$\Gamma_{TM} = \frac{n^2 \cos\theta - \sqrt{n^2 - \sin^2\theta}}{n^2 \cos\theta + \sqrt{n^2 - \sin^2\theta}} = 0.052$$

2. Določite lomni količnik jedra $n_1=?$ in polmer jedra $a=?$ svetlobnega vlakna, ki naj bo enorodovno za zeleno svetlobo $\lambda_{d1}=514 \text{ nm}$ in modro svetlobo $\lambda_{d2}=488 \text{ nm}$ argonskega laserja! Vlakno ima oblogo z lomnim količnikom $n_2=1.48$. Želimo numerično aperturo $NA=0.1$ in čimvečje jedro.

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \rightarrow n_1 = \sqrt{n_2^2 + NA^2} = 1.48337$$

$$\lambda_2 < \lambda_1 \rightarrow V_2 = 2.405 = k_0 a NA = \frac{2\pi}{\lambda_2} a NA \rightarrow a = \frac{2.405 \lambda_2}{2\pi NA} = 1.868 \mu\text{m}$$

3. Polprevodniški DFB laser na valovni dolžini $\lambda=1550 \text{ nm}$ ima vgrajen Mach-Zehnderjev modulator na isti polprevodniški podlagi z $U_{pi}=2.2 \text{ V}$. Izračunajte potrebno izhodno moč električnega krmilnika $P_m=?$ (v dBm), da dosežemo naboljše ugasno razmerje modulatorja! Krmilna elektroda modulatorja je v samem čipu zaključena na karakteristično impedanco $Z_k=50 \Omega$, z dodatno elektrodo pa nastavimo delovno točko modulatorja tako, da krmilni signal ne potrebuje enosmerne komponente.

$$P_m = \frac{U_{pi}^2}{4Z_k} = 24.2 \text{ mW}$$

$$P_m[\text{dBm}] = 10 \log \frac{P_m}{1 \text{ mW}} = +13.8 \text{ dBm}$$

4. Transimpedančni PIN-FET sprejemnik je izdelan za bitno hitrost $R=2.488 \text{ Gbit/s}$ in dosega občutljivost $P_{smin}=-25 \text{ dBm}$ za vhodni svetlobni signal z valovno dolžino $\lambda=1550 \text{ nm}$. Kolikšno občutljivost $P_{smin}'=?$ (v dBm) dosežemo z istim sprejemnikom pri isti valovni dolžini in bitni hitrosti $R'=622 \text{ Mbit/s}$, če električni šum na izhodu sprejemnika omejimo s prilagojenim nizkoprepustnim sitom? ($h=6.625 \times 10^{-34} \text{ Js}$, $k_B=1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$, $Q_e=-1.6 \times 10^{-19} \text{ As}$, $c=3 \times 10^8 \text{ m/s}$)

$$P_{Ne} = B k_B T ; B \approx R/2$$

$$P_{se} \propto P_{s0}^2 \rightarrow P_{s0}'/P_{s0} = \sqrt{P_{se}'/P_{se}} = \sqrt{P_{Ne}'/P_{Ne}} = 0.5$$

$$\frac{P_{Ne}'}{P_{Ne}} = \frac{R'}{R} = \frac{622 \text{ Mbit/s}}{2488 \text{ Mbit/s}} = 0.25$$

$$P_{smin}'[\text{dBm}] = P_{smin} + 10 \log \frac{P_{s0}'}{P_{s0}} = -28 \text{ dBm}$$

5. Svetlobno vlakno s povprečnim koeficientom barvne razpršitve $D=17 \text{ ps/nm.km}$ uporabljamo na dveh valovnih dolžinah $\lambda_{d1}=1532 \text{ nm}$ in $\lambda_{d2}=1560 \text{ nm}$. Kolikšna je razlika hitrosti valovanja $\Delta t=?$ (v m/s) med obema valovnima dolžinama?

$$(c=3 \times 10^8 \text{ m/s}) \quad \bar{n} \approx 1.5 \text{ povprečni lomni količnik}$$

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{l}{v_2} - \frac{l}{v_1} = l \frac{n_1 - n_2}{n_1 v_2} = l \frac{\Delta n}{\bar{n}^2}$$

$$\Delta t = D \cdot l \cdot \Delta \lambda \rightarrow \frac{\Delta t}{l} = D(\lambda_2 - \lambda_1)$$

$$\frac{\Delta t}{l} = 476 \text{ ps/km}$$

$$\Delta n = \frac{\Delta t}{l} \bar{n}^2 = D(\lambda_2 - \lambda_1) \left(\frac{c_0}{\bar{n}}\right)^2 = 19040 \text{ m/s} \approx 19 \text{ km/s}$$

1. Nepolarizirana sončna svetloba $S_v=1\text{ kW/m}^2$ vpada pod kotom $\theta=30^\circ$ na vodno gladino ($n=1.33$ pri valovni dolžini $\lambda=0.5\mu\text{m}$). Izračunajte gostoto moči odbitega žarka $S_o=?$ v praznem prostoru nad vodno gladino! ($c=3\text{E}+8\text{ m/s}$)

$$r_{TE} = \frac{\cos\theta - \sqrt{n^2 - \sin^2\theta}}{\cos\theta + \sqrt{n^2 - \sin^2\theta}} = -0.175$$

$$S_o = S_v \left(\frac{1}{2} |r_{TE}|^2 + \frac{1}{2} |r_{TM}|^2 \right) = \underline{\underline{21.1 \text{ W/m}^2}}$$

$$r_{TM} = \frac{n^2 \cos\theta - \sqrt{n^2 - \sin^2\theta}}{n^2 \cos\theta + \sqrt{n^2 - \sin^2\theta}} = 0.108$$

2. Izračunajte numerično aperturo $NA=?$ vlakna v laserskem svetlobnem ojačevalniku, ki ima premer jedra $2a=3\mu\text{m}$! Vlakno mora biti enorodovno na valovnih dolžinah $\lambda_1=975\text{ nm}$ in $\lambda_2=1560\text{ nm}$. Kolikšen naj bo lomni količnik aktivnega jedra $n_1=?$, če je obloga iz čistega kremenovega stekla z $n_2=1.463$? ($c=3\text{E}+8\text{ m/s}$)

$$V = k_0 a NA = 2.405 \quad NA = \frac{2.405 \lambda_1}{\pi 2a} = \underline{\underline{0.249}}$$

$$\lambda_1 < \lambda_2 \rightarrow k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_1} \quad NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \rightarrow n_1 = \sqrt{n_2^2 + NA^2} = \underline{\underline{1.484}}$$

3. Palčko Nd:YAG dolžine $l=5\text{ cm}$ uporabimo v laserju na valovni dolžini $\lambda=1064\text{ nm}$ (v praznem prostoru). Na katerem vzdolžnem rodu TEM_{00m}, $m=?$ niha laser, če je palčka na obeh koncih opremljena z zrcali in znaša lomni količnik Nd:YAG $n=1.818$? Kolikšna je frekvenčna razdalja $\Delta f=?$ med sosednjima TEM rodovoma? ($c=3\text{E}+8\text{ m/s}$)

$$n \frac{2\pi}{\lambda_0} 2l = 2\pi m \rightarrow m = \frac{2nl}{\lambda_0} = \underline{\underline{170865}}$$

$$\Delta f = \frac{c_0}{2ln} = \underline{\underline{1650 \text{ MHz}}}$$

4. Svetlobni signal povprečne moči $P=-20\text{ dBm}$ na valovni dolžini $\lambda=1560\text{ nm}$ vpada na fotodiodo s kvantnim izkoristkom $\eta=70\%$. Izračunajte elektrino $Q=?$, ki jo ustvari na fotodiodi logična enica! Hitrost prenosa podatkov znaša $C=1\text{ Gbit/s}$ in dvojiško linijsko kodiranje zagotavlja 50% enic in 50% ničel. Ugasno razmerje oddajnika je $a=10\text{ dB}$. ($h=6.625\text{E}-34\text{ J/K}$, $c=3\text{E}+8\text{ m/s}$, $q_e=-1.6\text{E}-19\text{ As}$)

$$a = 10\text{ dB} = 10 \quad P = \frac{1}{2} P_1 + \frac{1}{2} P_0 = \frac{1}{2} P_1 + \frac{1}{20} P_1 = \frac{11}{20} P_1 \rightarrow P_1 = \frac{20}{11} P = \underline{\underline{18.18 \mu\text{W}}}$$

$$P = -20\text{ dBm} = 10 \mu\text{W} \quad Q = N |q_e| = \frac{W}{W_f} |q_e| = \frac{\eta P \lambda |q_e|}{C h c_0} = \underline{\underline{1.6 \cdot 10^{-14} \text{ As}}}$$

$$P_0 = \frac{1}{a} P_1 = \frac{1}{10} P_1 \quad W = P/C \quad W_f = hf = h \frac{c_0}{\lambda}$$

5. Svetlobna zveza uporablja običajno vlakno G.652 z barvno razpršitvijo $D=17\text{ ps/nm.km}$ pri valovni dolžini $\lambda=1550\text{ nm}$ in omogoča zmogljivost $C=10\text{ Gbit/s}$. Kolikšno zmogljivost $C'=?$ dosežemo na isti razdalji z uporabo NZDSF vlakna z $D'=5\text{ ps/nm.km}$, če v obeh primerih uporabljamo svetlobni vir z zelo ozkim spektrom in domet omejuje nekompenzirana barvna razpršitev?

$$\Delta t = \frac{1}{C} = l D \Delta \lambda = l D \frac{\lambda^2}{c_0} C \rightarrow C = \sqrt{\frac{c_0}{l D \lambda^2}} \quad C' = \sqrt{\frac{c_0}{l D' \lambda^2}}$$

$$\Delta \lambda = \frac{\lambda^2}{c_0} \Delta f = \frac{\lambda^2}{c_0} C$$

$$C' = C \sqrt{\frac{D}{D'}} = \underline{\underline{18.44 \text{ Gbit/s}}}$$

=====

1. Elektromagnetno valovanje vpada pod pravim kotom iz praznega prostora na snov z lomnim količnikom $n=4$. Od površine snovi se odbije $S_o/S_v=1/9$ vpadne moči. Kolikšni sta dielektričnost $\epsilon_r=?$ in permeabilnost $\mu_r=?$ snovi, če je snov brezizgubna? Poiščite vse rešitve naloge! ($c=3E+8m/s$)

$$\left. \begin{aligned} \Gamma &= \pm \sqrt{\frac{S_o}{S_v}} = \pm 0,333 ; n = \sqrt{\mu_r \epsilon_r} \\ \Gamma &= \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0} \rightarrow Z = Z_0 \frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma} = Z_0 \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \end{aligned} \right\} \begin{aligned} \mu_r &= \frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma} n^2 & \Gamma = +0,333 \rightarrow \mu_r = 8 ; \epsilon_r = 2 \\ \epsilon_r &= \frac{1 - \Gamma}{1 + \Gamma} n^2 & \Gamma = -0,333 \rightarrow \mu_r = 2 ; \epsilon_r = 8 \end{aligned}$$

2. Kolikšna sme biti debelina aktivne laserske plasti $d=?$ z lomnim količnikom $n_1=3.8$, da polprevodniški laser ne more nihati na več prečnih rodovih na valovni dolžini $\lambda=1550nm$? Lomni količnik oblog znaša $n_2=3.6$. ($c=3E+8m/s$)

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = 1.217$$

$$\pi \geq V = k_0 d NA \rightarrow d \leq \frac{\pi}{k_0 NA} = \frac{\lambda}{2 NA} = 637nm = 0.637 \mu m$$

3. Oddajnik vsebuje elektroabsorpcijski modulator z ugasnim razmerjem $a=10dB$. Z upoštevanjem slabljenja zveze ima signal na vходу sprejemnika povprečno jakost $P_s=-20dBm$ pri razmerju pogostnosti enic/ničel=50/50. Kolikšen tok $I_1=?$ (μA) požene skozi fotodiodo enica in kolikšen tok $I_0=?$ (μA) ničla, če znaša odzivnost fotodiode $I/P=0.66A/W$

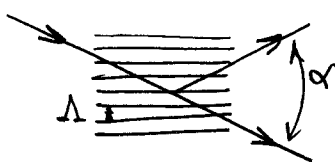
$$\begin{aligned} a=10dB=10 &= \frac{P_1}{P_0} & P_1=10P_0 &= 18,18\mu W & I_1 &= P_1(I/P) = 12\mu A \\ P_s=-20dBm &= 10\mu W & I_0 &= P_0(I/P) = 1.2\mu A \end{aligned}$$

$$P_s = \frac{1}{2} P_1 + \frac{1}{2} P_0 = \frac{1}{2} 10P_0 + \frac{1}{2} P_0 = \frac{11}{2} P_0 \rightarrow P_0 = \frac{2}{11} P_s = 1.818\mu W$$

4. Izračunajte odzivnost $I/P=?$ (v A/W) plazovne fotodiode (APD) s heterostrukturo InGaAsP na valovni dolžini $\lambda=1550nm$! Kvantni izkoristek fotodiode znaša $\eta=70\%$. Zaporno napetost nastavimo za faktor množenja $M=20$. ($h=6.625E-34Js$, $c=3E+8m/s$, $q_e=-1.6E-19As$, $m_e=9.1E-31kg$)

$$I/P = \frac{\frac{dQ}{dt}}{\frac{dW}{dt}} = \frac{Q}{W} = \frac{M M |Q_e|}{h f} = \frac{M M |Q_e| \lambda}{h c} = \frac{20 \cdot 0.7 \cdot 1.6 \cdot 10^{-19} As \cdot 1.55 \cdot 10^{-6} m}{6.625 \cdot 10^{-34} Js \cdot 3 \cdot 10^8 m/s} = 17.5 A/W$$

5. Akustooptični modulator dela na osnovi Bragg-ovega odboja s frekvenco zvočnega valovanja $f=105MHz$. Hitrost zvočnega valovanja v steklu znaša $v=3.5km/s$. Za kolikšen kot $\alpha=?$ spremeni svojo smer v zraku vpadni žarek argonskega laserja z valovno dolžino $\lambda=488nm$ v zraku, ko vključimo izvor zvoka? Lomni količnik stekla je $n=1.5$.



$$\begin{aligned} \Lambda \sin \alpha/2 &= \frac{\lambda}{2} & \alpha &= 2 \arcsin \frac{\lambda f}{2v} = 0.839^\circ = 14.6 mrd \\ \Lambda &= \frac{v}{f} \end{aligned}$$

1. Žarek podvodne svetilke ($f=600\text{THz}$) se na vodni gladini popolnoma odbije, pri tem pa svetlobno polje v zraku $n_2=1$ nad gladino vode ($n_1=1.33$) upade za $a=60\text{dB}$ na višini $z=0.1\text{mm}$ nad gladino. Kolikšen je vpadni kot žarka Θ ? ($c=3\text{E}+8\text{m/s}$)

$$a = 20 \log e^{|k_{z1}|z} = \frac{20}{\ln 10} |k_{z1}|z$$

$$k_i^2 = k_1^2 + k_{z1}^2 \rightarrow k_1 = \sqrt{k_i^2 - k_{z1}^2} = \sqrt{k_i^2 + |k_{z1}|^2} = 12.57 \cdot 10^{12} \text{ m}^{-1}$$

$$k_1 = n_1 \frac{2\pi f}{c} = 16.71 \text{ m}^{-1}$$

$$\Theta = \arcsin \frac{k_{z1}}{k_1} = 48.75^\circ = 0.851 \text{ rad}$$

$$\rightarrow |k_{z1}| = \frac{a \ln 10}{20z} = 6908 \text{ m}^{-1}$$

$$k_2 = n_2 \frac{2\pi f}{c} = 12.57 \cdot 10^{12} \text{ m}^{-1}$$

2. Izračunajte število rodov $N=?$ (vsota TE in TM), ki jih vodi planarna struktura z lomnim količnikom sredice $n_1=1.481$ ter oblogama z lomnim količnikom $n_2=1.485$, oboje pri valovni dolžini $\lambda=1300\text{nm}$ (v praznem prostoru)! Debelina sredice znaša $d=0.16\text{mm}$. ($c=3\text{E}+8\text{m/s}$)

$$n_2 > n_1 \Rightarrow \underline{N=0} \text{ (NI VODENIH RODOV)}$$

3. NdYAG laser za graviranje dela s povprečno izhodno močjo $P=50\text{W}$ na valovni dolžini $\lambda=1064\text{nm}$. Izračunajte potrebno moč svetlobne črpalke $P_c=?$ na valovni dolžini $\lambda_c=820\text{nm}$, če laser izkoristi $\eta=70\%$ fotonov črpalke! ($h=6.625\text{E}-34\text{Js}$)

$$P_c = \frac{P}{\eta} \frac{W_{fc}}{W_f} = \frac{P}{\eta} \frac{h \frac{c}{\lambda_c}}{h \frac{c}{\lambda}} = \frac{P \lambda}{\eta \lambda_c} = \underline{92.7 \text{ W}}$$

4. Izračunajte faktor množenja $M=?$ fotopomnoževalke, če za svetlobni impulz z $N=1000$ fotoni dobimo izhodni električni impulz s $Q=1\text{pAs}$! Kvantni izkoristek fotopomnoževalke znaša $\eta=0.2$ pri valovni dolžini $\lambda=500\text{nm}$. ($h=6.625\text{E}-34\text{Js}$, $Q_e=-1.6\text{E}-19\text{As}$, $c=3\text{E}+8\text{m/s}$)

$$Q = N \eta |Q_e| \cdot M \rightarrow M = \frac{Q}{N \eta |Q_e|} = \underline{31250}$$

5. Izračunajte domet zveze $d=?$ z zmogljivostjo $C=100\text{Gbit/s}$ in preprosto modulacijo vklop/izklop oddajnika po enorodovnem svetlobnem vlaknu z barvno razpršitvijo $D=17\text{ps/nm.km}$ na valovni dolžini $\lambda=1550\text{nm}$! Polarizacijsko rodovno razpršitev zanemarimo. Oddajnik uporablja zunanji modulator, da je spektralna širina vira dosti manjša od spektra modulacije.

($c=3\text{E}+8\text{m/s}$)

$$\Delta f = 2 \cdot \frac{C}{2} = C$$

$$\Delta \lambda = \Delta f \frac{\lambda_0^2}{c} = C \frac{\lambda_0^2}{c}$$

$$\Delta t = \frac{1}{C} = D \Delta \lambda d = D C \frac{\lambda_0^2}{c} d$$

$$\rightarrow d = \frac{c}{D C^2 \lambda_0^2} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{17 \frac{10^{-12} \text{ s}}{10^{-3} \text{ m} \cdot 10^3 \text{ m}} (10^{11} \text{ /s})^2 (1.55 \cdot 10^6 \text{ m})^2} = \underline{735 \text{ m}}$$

1. Končni izdelek želimo enorodovno svetlobno vlakno z zunanjim premerom $2r=0.125\text{mm}$, oblogo iz čistega kremenovega stekla $n_2=1.46$, numerično aperturo $NA=0.1$ in mejno frekvenco višjih rodov $f=240\text{THz}$. Kolikšen naj bo premer jedra surovca (preforma) $2a_s=?$ in kolikšen njegov lomni količnik $n_1=?$ Surovec naj bo dolžine $l_s=1\text{m}$ in zunanjega premera $2r_s=25\text{mm}$? Difuzijo dopantov med vlečenjem vlakna zanemarimo! ($c=3E+8\text{m/s}$)

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \rightarrow n_1 = \sqrt{n_2^2 + NA^2} = \underline{\underline{1.4634}} \quad 2a_s = 2a \frac{2r_s}{2r} = \underline{\underline{1.914\text{mm}}}$$

$$V = 2.405 = k_0 a NA = \frac{2\pi f}{c_0} a NA \rightarrow a = \frac{2.405 c_0}{2\pi f NA} = \underline{\underline{4.785\mu\text{m}}}$$

2. Dvojedrni dielektrični valovod ima utripno dolžino $\lambda=50\text{mm}$ pri frekvenci $f=194\text{THz}$. Kolikšna naj bo dolžina $l=?$ sklopnika z delilnim razmerjem moči $r=99/1$? Poiščite najkrajšo rešitev naloge! ($c=3E+8\text{m/s}$, $n_1=1.47$, $n_2=1.46$)

$$P_p = P_v \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos 2\pi \frac{l}{\lambda} \right) = 0.99 P_v$$

$$P_s = P_v \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos 2\pi \frac{l}{\lambda} \right) = 0.01 P_v$$

$$l = \frac{\lambda}{2\pi} \arccos(1 - 2 \cdot 0.01) = \frac{50\text{mm}}{2\pi} \cdot 0.200 = \underline{\underline{1.594\text{mm}}}$$

3. Lasersko ojačanje v valovodu polprevodniške diode dosega vrednost $G/l=15000\text{dB/m}$ pri frekvenci $f=230\text{THz}$. Pri kateri dolžini valovoda $l=?$ naprava zaniha kot oscilator zaradi odbojev na obeh koncih čipa, kjer svetloba prehaja iz jedra z lomnim količnikom $n_1=3.8$ naravnost v zrak ($n=1$)? ($c=3E+8\text{m/s}$)

$$|\Gamma_{TE}| = |\Gamma_{TM}| = \frac{n_1 - n}{n_1 + n} = \frac{3.8 - 1}{3.8 + 1} = \underline{\underline{0.583}} = |\Gamma|$$

$$G = -20 \log |\Gamma| = \underline{\underline{4.682\text{dB}}} \quad l = \frac{G}{G/l} = \underline{\underline{312\mu\text{m}}}$$

4. PIN-FET modul ima vgrajeno fotodiodo s kapacitivnostjo $C_d=0.2\text{pF}$ ter ojačevalnik z vhodno kapacitivnostjo $C_o=0.2\text{pF}$. Kapacitivnost povezave med fotodiodo in FETom znaša $C_p=0.6\text{pF}$, kar omogoča vhodno občutljivost sprejemnika $P_s=-35\text{dBm}$. Kolikšna bo občutljivost sprejemnika $P_s'=?$, če v izboljšani izvedbi uspemo znižati kapacitivnost povezav na $C_p'=0.1\text{pF}$? ($c=3E+8\text{m/s}$, $k_B=1.38E-23\text{J/K}$, $T=300\text{K}$, $Q_e=-1.6E-19\text{As}$, $h=6.625E-34\text{Js}$, $\eta=70\%$)

$$U_s = \frac{N_f \eta |Q_e|}{C} \quad U_s/U_N = N_f \eta |Q_e| \sqrt{\frac{2\pi}{k_B T C}} = N_f \eta |Q_e| \sqrt{\frac{2\pi}{k_B T C'}} \quad 10 \log P_s' = 10 \log P_s + 10 \log \frac{P_s'}{P_s}$$

$$U_N = \sqrt{\frac{k_B T}{2\pi C}} \quad \frac{P_s'}{P_s} = \frac{N_f'}{N_f} = \sqrt{\frac{C'}{C}} = \sqrt{\frac{C_d + C_p' + C_o}{C_d + C_p + C_o}} = \sqrt{\frac{0.2 + 0.1 + 0.2}{0.2 + 0.6 + 0.2}} = \underline{\underline{0.707}} \quad 10 \log P_s' = -35\text{dBm} - 1.505\text{dB}$$

5. Erbijev vlakenski ojačevalnik črpamo s polprevodniškim laserjem moči $P_L=80\text{mW}$ na valovni dolžini $\lambda=980\text{nm}$. Kolikšno je ojačanje ojačevalnika $G=?$ (v dB) za male signale, če se brez vhodnega signala vsa moč pretvori v ojačano spontano sevanje (ASE šum) v pasovni širini $B=4\text{THz}$ okoli osrednje frekvence $f=194\text{THz}$? Izgube v WDM sklopnikih in izolatorjih zanemarimo. ($c=3E+8\text{m/s}$, $h=6.625E-34\text{Js}$)

$$\lambda_c = 980\text{nm} \rightarrow \mu = 1 \quad P_{ASE} = \mu(G-1) h f B = \frac{1}{4} P_L \left(\frac{\lambda_c}{\lambda} \right) \leftarrow \text{razvoj energije fotovoltov}$$

$$\lambda = \frac{c_0}{f} = \underline{\underline{1546\text{nm}}} \quad G = \frac{P_L}{4} \left(\frac{\lambda_c}{\lambda} \right) \frac{1}{\mu h f B} + 1 = 24655 = \underline{\underline{43.92\text{dB}}}$$

1. Svetlobni žarek z gostoto moči $S_v=100\text{W/m}^2$ vpada pod pravim kotom iz praznega prostora na vodno gladino z $n=1.33$. Izračunajte največje $E_{\max}=?$ in najmanjše $E_{\min}=?$ električno polje zaradi stojnega vala nad gladino! ($\lambda=500\text{nm}$, $c=3\text{E}+8\text{m/s}$, $Z_0=377\text{ohm}$)

$$|r| = \left| \frac{1-n}{1+n} \right| = 0.142$$

$$E_{\max} = E_v(1+|r|) = 314\text{V/m}$$

$$E_{\min} = E_v(1-|r|) = 236\text{V/m}$$

$$S = \frac{|E|^2}{2Z_0} \rightarrow E_v = \sqrt{2S_v Z_0} = 275\text{V/m}$$

2. Svetlobno vlakno ima pri valovni dolžini $\lambda_1=850\text{nm}$ slabljenje $a_1=3\text{dB/km}$. Kolikšno slabljenje $a_2=?$ pričakujemo pri valovni dolžini $\lambda_2=1300\text{nm}$, če je poglaviti izvor slabljenja Rayleigh-ovo sipanje svetlobe v steklu?

$$\text{Rayleigh: } a = \alpha \lambda^{-4}$$

$$\frac{a_2}{a_1} = \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1} \right)^{-4} \rightarrow a_2 = a_1 \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right)^4 = 0.55\text{dB/km}$$

3. Kolikšna je ločljivost $\Delta f=?$ optičnega spektralnega analizatorja pri osrednji valovni dolžini $\lambda=1550\text{nm}$? Spektralni analizator vsebuje Fabry-Perot-ov rezonator z zrcali z odbojnostjo $G=0.99$ na razdalji $l=1\text{mm}$. ($c=3\text{E}+8\text{m/s}$)

$$Q = \omega \frac{W_{\text{rezonatorja}}}{P_{\text{izgub}}} ; P_{\text{izgub}} = 2P_N(1-|r|^2) ; W_{\text{rez}} = 2P_N t = 2P_N \frac{l}{c_0}$$

$$\Delta f = \frac{f}{Q} = \frac{P_{\text{izgub}}}{2\pi W_{\text{rez}}} = \frac{(1-|r|^2)c_0}{2\pi l} = \frac{(1-0.99^2) \cdot 3 \cdot 10^8 \text{m/s}}{2\pi \cdot 10^{-3} \text{m}} = 950\text{MHz}$$

4. Fotopomnoževalka ima $N=10$ množilnih elektrod s povprečnim faktorjem množenja $M=4$. Kolikšna svetlobna moč $P_0=?$ (v dBm) vpada na fotokatodo s kvantnim izkoristkom $\eta=20\%$ pri valovni dolžini $\lambda=633\text{nm}$, če znaša anodni tok $I_a=1\text{mA}$? ($h=6.625\text{E}-34\text{Js}$, $q_e=1.6\text{E}-19\text{As}$, $c=3\text{E}+8\text{m/s}$)

$$P_0 = \frac{W_f}{\eta|q_e|} I_k = \frac{h c_0}{\lambda \eta |q_e|} \frac{I_a}{M^N} = \frac{6.625 \cdot 10^{-34} \text{Js} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{m/s}}{633 \cdot 10^{-9} \text{m} \cdot 0.2 \cdot 1.6 \cdot 10^{-19} \text{As}} \cdot \frac{10^{-3} \text{A}}{4^{10}}$$

$$P_0 = 9.36\text{nW} = -50.3\text{dBm}$$

5. Izhoda dveh enako močnih laserjev na valovnih dolžinah $\lambda_1=1545\text{nm}$ in $\lambda_2=1548\text{nm}$ združimo s sklopnikom 50/50 in peljemo na skupni amplitudni modulator. Izhod modulatorja peljemo po vlaknu z barvno razpršitvijo $D=17\text{ps/nm.km}$ na fotodiodo. Pri kateri (najkrajši) dolžini vlakna $l=?$ sinusna modulacija s frekvenco $f=1\text{GHz}$ na fotodiodi izgine?

$$\Delta t = D l \Delta \lambda = D l (\lambda_2 - \lambda_1) = \frac{T}{2} = \frac{1}{2f} \rightarrow l = \frac{1}{2fD(\lambda_2 - \lambda_1)} = 9.8\text{km}$$

izgine pri $\varphi=180^\circ$ $\uparrow$

1. Žarek svetlobe moči $P_v = 1W$ vpada pod pravim kotom ($\Theta = 0$) iz praznega prostora na gladino neznane dielektrične tekočine. Pri tem znaša moč odbitega žarka $P_o = 20mW$. Kolikšen je lomni količnik neznane tekočine $n = ?$, če je vpadna svetloba na valovni dolžini $\lambda = 514nm$ nepolarizirana? ($c = 3E+8m/s$)

pravokotni vpad $|r|^2 = \frac{P_o}{P_v} \rightarrow |r| = \sqrt{\frac{P_o}{P_v}} = 0.141$

$|r| = \frac{n-1}{n+1} \rightarrow n = \frac{1+|r|}{1-|r|} = 1.329$

2. Zrnca umazanije sicer ne senči svetlobnega žarka, ampak preprečuje, da bi se feruli dveh FC konektorjev dotaknili v spojki. Meritev prevajalne funkcije takšnega slabega spoja pokaže dva sosednja maksimuma pri $\lambda_1 = 1530nm$ in $\lambda_2 = 1568nm$, vmes je en sam minimum. Kolikšna je debelina zrnca oziroma širina zračne reže $d = ?$ med ferulama? ($c = 3E+8m/s$)

FP rezonator: $d = (m+1) \frac{\lambda_1}{2} = m \frac{\lambda_2}{2}$

$m = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \text{ (cedoštevilo?)} \rightarrow d = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{2(\lambda_2 - \lambda_1)} = 31.6 \mu m$

3. Zunanji elektro-optični modulator z Mach-Zehnder-jevim interferometrom na podlagi $LiNbO_3$ ima $U_{pTE} = 6V$ in $U_{pTM} = 15V$. Električni vhod modulatorja ima nazivno impedanco $Z = 50\Omega$. Z ločeno krmilno elektrodo nastavimo delovno točko na sredino odziva. Kolikšna električna krmilna moč je potrebna za visoko ugasno razmerje v obeh primerih $P_{TE} = ?$ in $P_{TM} = ?$, če ima sporočilo v povprečju 50% enic in 50% ničel?

$P = \frac{U^2}{R} = \frac{(U_{pTE})^2}{Z} \quad P_{TE} = \frac{U_{pTE}^2}{4Z} = \frac{(6V)^2}{4 \cdot 50\Omega} = 0.18W = +22.5dBm$

bias na polovici! $P_{TM} = \frac{U_{pTM}^2}{4Z} = \frac{(15V)^2}{4 \cdot 50\Omega} = 1.125W = +30.5dBm$

4. PIN-FET sprejemniški modul vsebuje električni ojačevalnik s šumno temperaturo $T = 200K$. Skupna kapacitivnost fotodiode, vhoda ojačevalnika in povezav znaša $C = 1pF$. Določite razmerje $U_{enice}/U_{eff\sum}$ v decibelih na električnem izhodu sprejemnika! Logično enico predstavlja $N = 3000$ fotonov valovne dolžine $\lambda = 1310nm$. Kvantni izkoristek fotodiode znaša $\eta = 0.75$. ($h = 6.625E-34Js$, $k_B = 1.38E-23J/K$, $q_e = 1.6E-19As$)

$U_{enice} = \frac{N q_e |q_{el}|}{C} = \frac{3000 \cdot 0.75 \cdot 1.6 \cdot 10^{-19} As}{10^{-12} As/V} = 360\mu V \quad 20 \log \left(\frac{U_{enice}}{U_{eff\sum}} \right) = 24.7dB$

$U_{eff\sum} \approx \sqrt{\frac{k_B T}{2q_e C}} = \sqrt{\frac{1.38 \cdot 10^{-23} J/K \cdot 200K}{2 \cdot 1.6 \cdot 10^{-19} As/V}} = 21\mu V$

5. Laserski ojačevalnik uporablja dopirano vlakno, ki vsebuje skupno $N = 1E+15$ erbijevih ionov Er^{3+} . Kolikšna je potrebna moč črpalke $P_c = ?$ na valovni dolžini $\lambda_{pč} = 980nm$, da dosežemo popolno inverzno naseljenost v odsotnosti vhodnega signala na valovni dolžini $\lambda = 1550nm$? Časovna konstanta spontanega sevanja Er^{3+} ionov znaša $\tau = 10ms$. ($c = 3E+8m/s$, $h = 6.625E-34Js$)

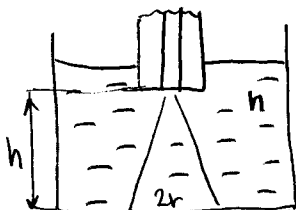
$P_c = \frac{W}{\tau} = \frac{N W_f}{\tau} = \frac{N h f}{\tau} = \frac{N h c}{\tau \lambda_f} = \frac{10^{15} \cdot 6.625 \cdot 10^{-34} Js \cdot 3 \cdot 10^8 m/s}{10 \cdot 10^{-3} s \cdot 980 \cdot 10^{-9} m} = 20.3mW = +12dBm$

1. Izračunajte lomni količnik $n=?$ in debelino $d=?$ (v μm) antirefleksnega sloja, ki ga nanesemo na površino čipa fotodiode z lomnim količnikom polprevodnika $n_p=3.9$! Svetloba z valovno dolžino $\lambda=1550\text{nm}$ vpada na čip iz praznega prostora pod pravim kotom.

$$n_{ar} = \sqrt{n_1 n_2} = \sqrt{n_p} = \sqrt{3.9} = \underline{\underline{1.975}}$$

$$d_{ar} = \frac{\lambda_{ar}}{4} = \frac{\lambda}{4 n_{ar}} = \frac{1550\text{nm}}{4 \cdot 1.975} = \underline{\underline{196\text{nm} = 0.196\mu\text{m}}}$$

2. Mnogorodovno telekomunikacijsko svetlobno vlakno 50/125 μm z numerčno aperturo $NA=0.2$ vzbujamo z vidno svetlobo. Pravilno odrezan konec vlakna potopimo navpično v vodo z lomnim količnikom $n=1.33$. Kolikšen je premer $2r=?$ osvetljenega kroga na dnu posode z vodo, če se konec vlakna nahaja v vodi na višini $h=10\text{cm}$ nad dnom? Lomni zakon:



$$n_1 \sin \alpha_1 = n_2 \sin \alpha_2 \rightarrow \alpha_2 = \arcsin \frac{NA}{n} = \underline{\underline{8.65^\circ}}$$



$$2r = 2h \tan \alpha_2 = \underline{\underline{3.04\text{cm}}}$$

3. Erbijev ojačevalnik za valovno dolžino $\lambda=1550\text{nm}$ črpamo s $P_c=100\text{mW}$ na valovni dolžini $\lambda_c=980\text{nm}$. Kolikšno vršno moč $P_{max}=?$ lahko dobimo pri ojačevanju redkih svetlobnih impulzov v trajanju $t=1\mu\text{s}$, če znaša časovna konstanta Er^{3+} ionov $\tau=10\text{ms}$? ($h=6.625\text{E}-34\text{Js}$, $c=3\text{E}+8\text{m/s}$)

$$P_{max} = P_c \frac{W_s}{W_p} \frac{\tau}{t} = P_c \frac{\lambda_c \tau}{\lambda t} = 100\text{mW} \frac{980\text{nm} \cdot 10\text{ms}}{1550\text{nm} \cdot 1\mu\text{s}} = \underline{\underline{632\text{W}}}$$

4. Na fotodiodo pripeljemo dva svetlobna signala s frekvencama $f_1=194.00\text{THz}$ in 194.01THz . Optična signala imata enako polarizacijo in enako moč $P_1=P_2=1\text{mW}$. Fotodioda ima odzivnost $I/P=0.7\text{A/W}$ v tem frekvenčnem pasu. Kolikšno visokofrekvenčno moč $P_{vf}=?$ dobimo na $\Delta f=10\text{GHz}$ na bremenu $Z_k=50\Omega$, če enosmerno komponento toka kratkostičimo z VF dušilko vzporedno bremenu? ($h=6.625\text{E}-34\text{Js}$, $q_e=-1.6\text{E}-19\text{As}$, $c=3\text{E}+8\text{m/s}$)

$$|E| = \alpha \sqrt{P} \quad P=P_1=P_2 \rightarrow I_{max} = (I/P) \cdot P_{max} = \underline{\underline{2.8\text{mA}}}; I_{vrhvrh} = I_{max} - I_{min} = \underline{\underline{2.8\text{mA}}}$$

$$E_{max} = |E_1| + |E_2| = 2\alpha \sqrt{P_1} \rightarrow P_{max} = 4P_1 = \underline{\underline{4\text{mW}}}; I_{eff} = \frac{I_{vrhvrh}}{2\sqrt{2}}$$

$$E_{min} = |E_1| - |E_2| = \underline{\underline{0}} \rightarrow P_{min} = \underline{\underline{0}}; I_{min} = \underline{\underline{0}} \quad P_{vf} = I_{eff}^2 Z_k = \frac{I_{vrhvrh}^2}{8} Z_k = \underline{\underline{49\mu\text{W} = -13.1\text{dBm}}}$$

5. Barvna razpršitev omejuje domet zveze po vlaknu G.652 na vrednost $d=70\text{km}$ ob uporabi kakovostnega oddajnika za $C=10\text{Gbit/s}$ pri $\lambda=1550\text{nm}$ ($B_{vira} \ll B_{modulacije}$). Kolikšen bo domet zveze $d'=?$ po enakem vlaknu in pri isti valovni dolžini, če zmogljivost povečamo na $C'=25\text{Gbit/s}$? Modulacija oddajnika ostaja v obeh primerih enaka OOK (On-Off Keying).

$$C \approx \frac{1}{\Delta t} = \frac{1}{D \Delta \lambda} = \frac{c}{D \Delta \lambda} \rightarrow d \approx \frac{c}{D \Delta \lambda} \rightarrow d' = d \left(\frac{C}{C'} \right)^2 = 70\text{km} \left(\frac{10\text{Gbit/s}}{25\text{Gbit/s}} \right)^2 = \underline{\underline{11.2\text{km}}}$$