

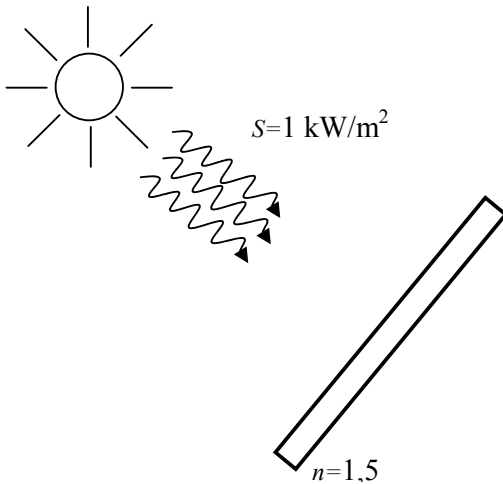
## KAZALO:

1. Pravokotni vpad svetlobe na snov	str. 3
2. Vpad svetlobe na snov pod kotom	str. 9
3. Vpad svetlobe na snov pod Brewsterjevim kotom	str. 14
4. Svetlovodi (planarni, krožni)	str. 28
5. Svetlobni sklopi	str. 52
6. Polarizacija	str. 61
7. Polarizacijska disperzija	str. 64
8. Kompenzacija disperzije	str. 65
9. Nelinearnost vlakna	str. 69
10. MCVD	str. 72
11. Spekter laserja	str. 77
12. Temperaturna odvisnost laserja	str. 88
13. Laserji splošno	str. 90
14. Mach-Zehnderjev elektrooptični modulator	str. 104
15. Akustooptika	str. 114
16. Fotodiode	str. 118
17. EDFA	str. 149
18. Optične zveze	str. 154

## 1. Pravokotni vpada svetlobe na snov

(VŠŠ, 9/4/1999, 1)

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



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

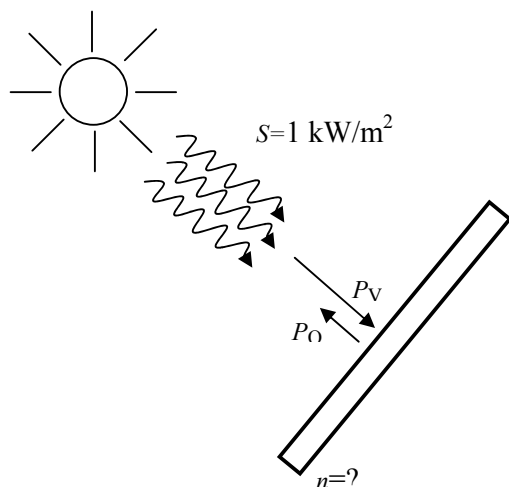
$$S' = S(1 - |\Gamma|^2) = 1000 \text{ W/m}^2 \cdot (1 - 0,04) = \underline{\underline{960 \text{ W/m}^2}}$$

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

$$E' = \sqrt{2ZS'} = \sqrt{\frac{2Z_0S'}{n}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 120\pi \Omega \cdot 960 \text{ W/m}^2}{1,5}} = \underline{\underline{695 \text{ V/m}}}$$

(VŠŠ, 15/2/2001, 1)

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



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

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

Rešitev lahko poiščemo, ko vzamemo negativni ali pozitivni predznak.

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

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

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

Tako snov je težko najti.

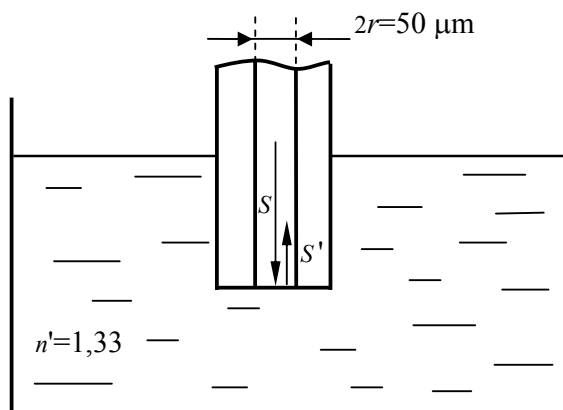
$$n-1 = (n+1) \sqrt{\frac{P_O}{P_V}}$$

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

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

(VŠŠ, 18/6/2003, 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 dB) na koncu vlakna, ki je odrezano pod pravim kotom ter potopljeno v tekočino z lomnim količnikom  $n'=1,33$  pri valovni dolžini  $\lambda=850 \text{ nm}$ !



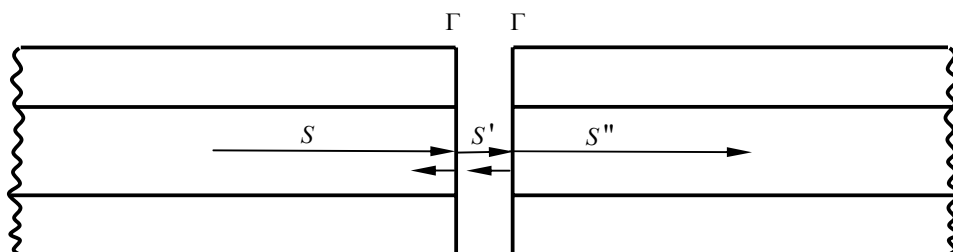
$$\theta_v = 0 \Rightarrow |\Gamma_{\text{TE}}| = |\Gamma_{\text{TM}}| = \left| \frac{n_1 - n'}{n_1 + n'} \right| = \frac{0,14}{2,80} = \underline{0,05}$$

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

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

(VŠŠ, 9/6/1999, 1)

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



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

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

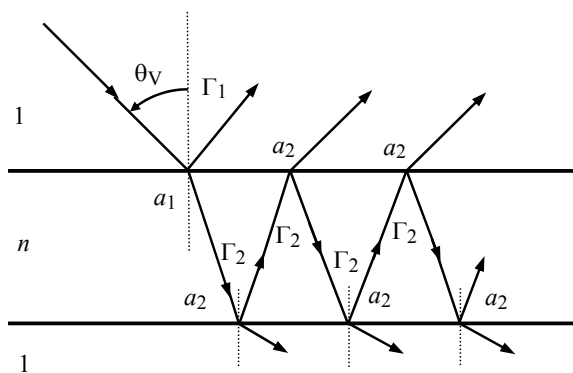
$$S'' = S'(1 - |\Gamma|^2) = S(1 - |\Gamma|^2)(1 - |\Gamma|^2) = S(1 - 2|\Gamma|^2 + |\Gamma|^4) \approx S(1 - 2|\Gamma|^2)$$

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

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

(VSS, 20/9/2000, 1)

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



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

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

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

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

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

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

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

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

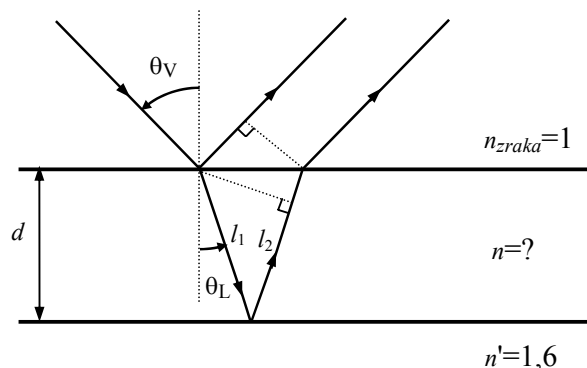
$$a_{2TM} = 10 \log|\Gamma_{2TM}|^2 = \underline{\underline{-20,723 \text{ dB}}}$$

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

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

(VSS, 14/3/2003, 1)

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



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

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

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

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

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

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

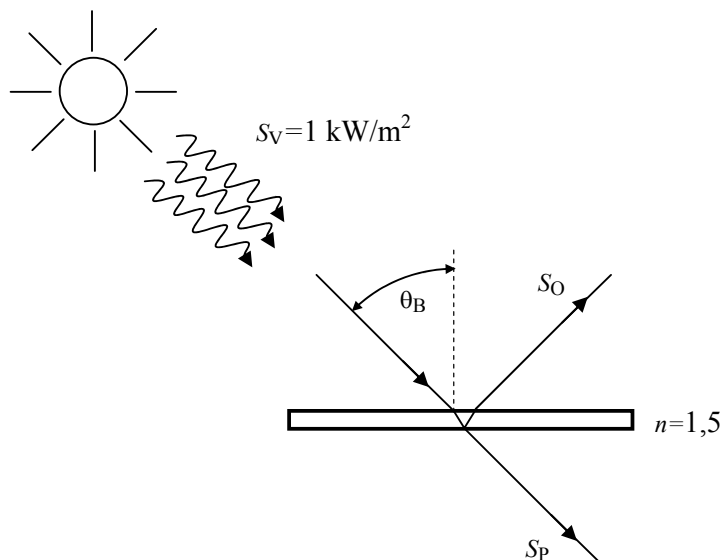
Iz Snell-ovega lomnega zakona med praznim prostorom in antirefleksnim slojem dobimo

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

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

(VŠŠ, 1/2/2000, 1)

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



Za valovanje, ki vpada pod Brewsterjevim kotom, je odbojnost TM komponente nič.

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

Iz česar sledi

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

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

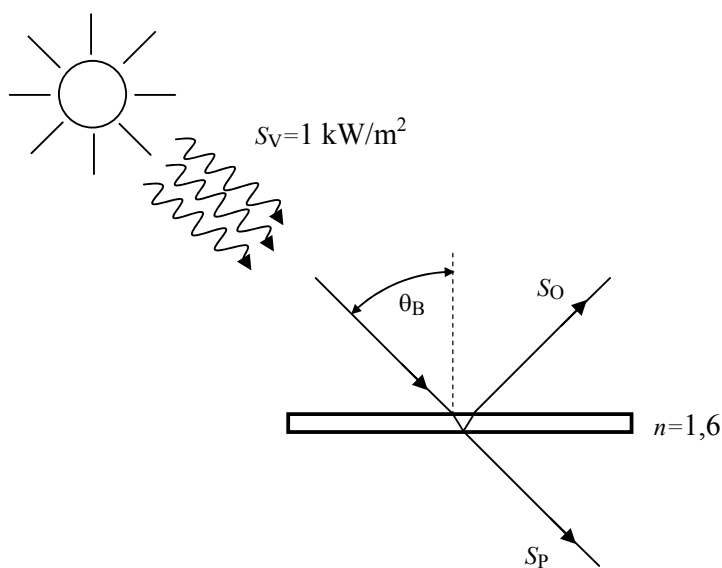
$$\Gamma_{\text{TE}} = \frac{\cos \theta_B - \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_B}}{\cos \theta_B + \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_B}} = \frac{1 - \sqrt{n^2(n^2 + 1) - n^2}}{1 + \sqrt{n^2(n^2 + 1) - n^2}} = \frac{1 - n^2}{1 + n^2} = \underline{\underline{-0,385}}$$

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



(VŠŠ, 5/7/2000, 1)

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



Najprej določimo Brewster-jev kot

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

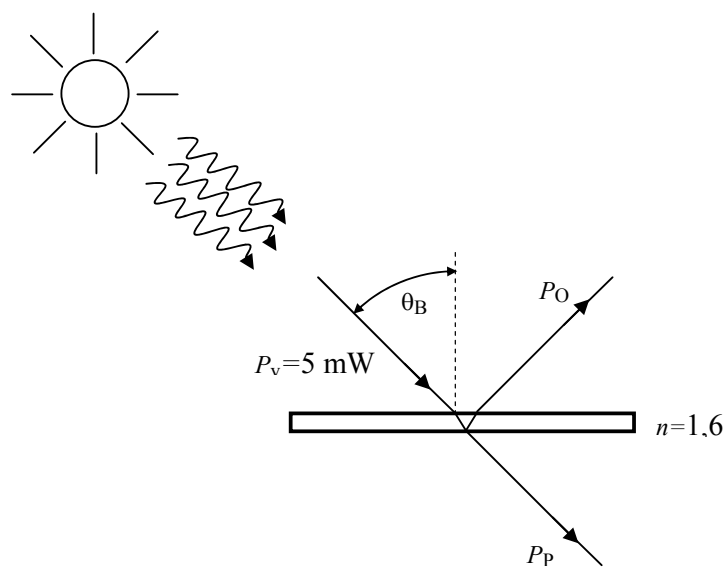
Odbojnost za TM komponento znaša nič, medtem ko je odbojnost TE komponente

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

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

(VŠŠ, 22/1/2003, 1)

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



Najprej določimo Brewster-jev kot.

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

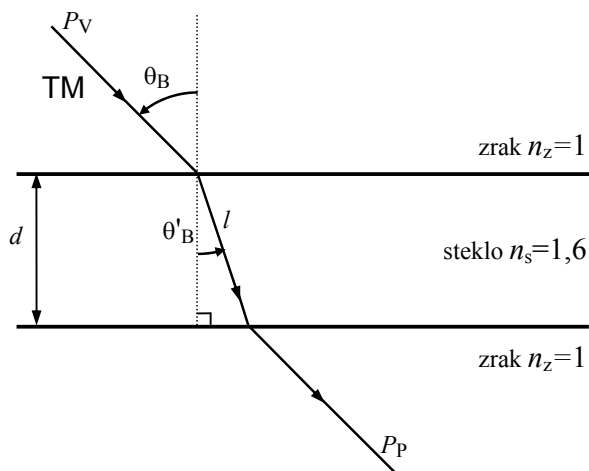
$$\Gamma_{TM} = \underline{0}$$

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

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

(VŠŠ, 02/02/2004, 1)

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



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

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

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

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

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

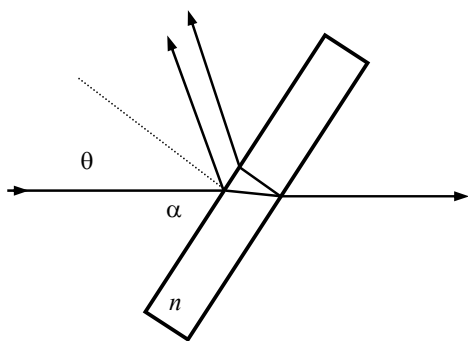
Po prehodu skozi steklo se žarek oslabi za  $a[\text{dB/m}] \cdot l = 100 \text{ dB/m} \cdot 17,7 \text{ mm} = 0,177 \text{ dB}$ .

Moč prepuščenega žarka torej znaša

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

(VŠŠ, 24/3/2000, 1)

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



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

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

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

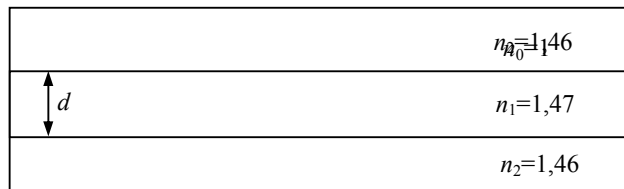
$$a = \left(1 - |\Gamma_{\text{TE}}|^2\right)^2 = \underline{\underline{0,653}}$$

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

#### 4. Svetlovodi (planarni, krožni)

(VŠŠ, 22/1/2002, 1)

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



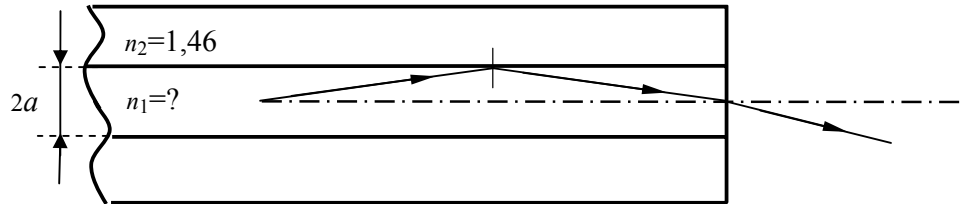
$$V = k_0 d \sqrt{n_1^2 - n_2^2} < \pi$$

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

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

(VŠŠ, 26/6/2002, 1)

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

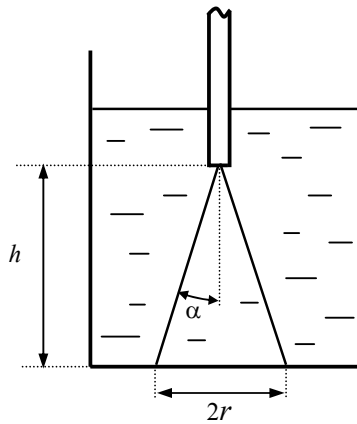


$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \rightarrow n_1 = \sqrt{NA^2 + n_2^2} = \underline{\underline{1,4634}}$$

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

(VŠŠ, 11/10/2002, 1)

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



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

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

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

(VSS, 9/4/1999, 2)

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

Višji rodovi pri  $V = 2,405$

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

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

Ker je  $n_2 \approx n_1$  sledi

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

$$V = k_0 a NA$$

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



(VSS, 9/6/1999, 2)

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

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

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

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

(VSS, 1/2/2000, 2)

Lomni količnik jedra mnogorodovnega gradientnega vlakna se spreminja po izrazu:

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

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

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

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

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

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

(VŠŠ, 24/3/2000, 2)

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

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

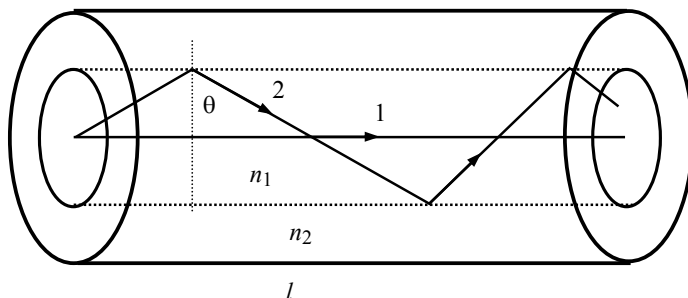
$$NA \approx n\sqrt{2\Delta} \rightarrow \frac{NA'}{NA} = \frac{\sqrt{2\Delta'}}{\sqrt{2\Delta}} = \frac{\sqrt{\Delta'}}{\sqrt{\Delta}} = \frac{a'}{a}$$

Numerična apertura drugega vlakna je potemtakem

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

(VSS, 15/2/2001, 2)

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



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

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

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

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

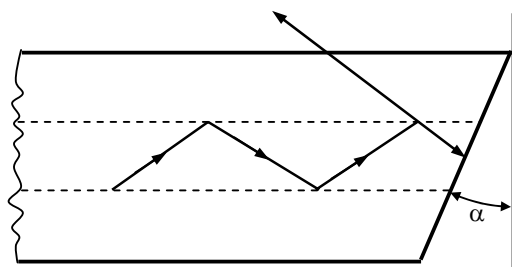
$$n_1^2 - n_1 n_2 - \frac{\Delta t c_0}{l} \cdot n_2 = 0$$

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

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

(VSŠ, 18/6/2003, 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?  $n_{\text{jedra}} \approx 1,5$



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

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

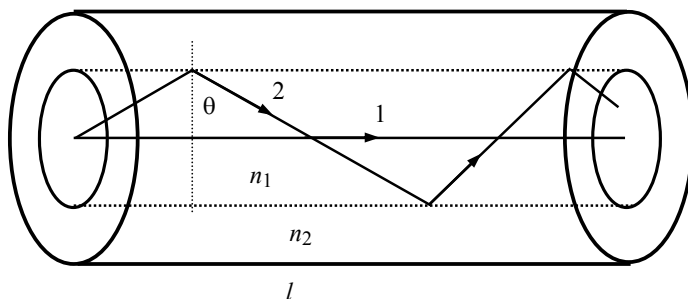
(VSŠ, 29/09/2004, 1)

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

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

(VŠŠ, 2/2/2004, 2)

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



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

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

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

Stopničasto vlakno:

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

Gradientno vlakno:

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

(VSS, 22/1/2003, 2)

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

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

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

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

(VSS, 19/9/2001, 2)

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

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

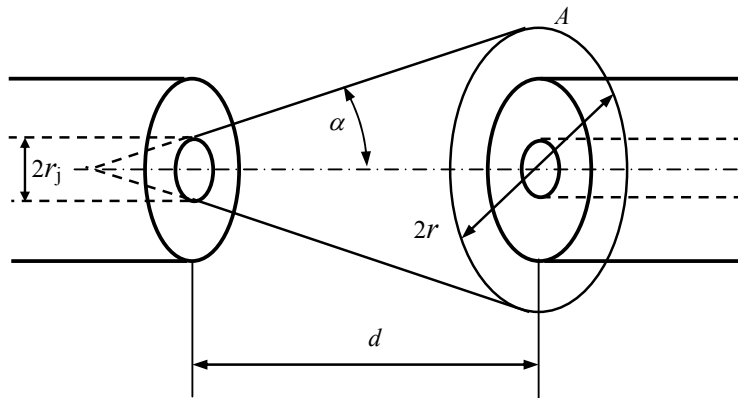
$$P_{\max} = S_{\max} \cdot A = S_{\max} \cdot \pi a^2 = \underline{\underline{0,417 \text{ W}}}$$



## 5. Svetlobni sklopi

(VSS, 18/1/2004, 2)

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



Zaradi razširitve sevalnega snopa iz prvega vlakna zapišemo

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

Kot  $\alpha$  izrazimo z numerično aperturo

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

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

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

Zmanjšana jakost signala je enaka razmerju površine snopa in jedra.

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

Izraz korenimo in izračunamo razmik

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

---

(VSS, 14/3/2003, 2)

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

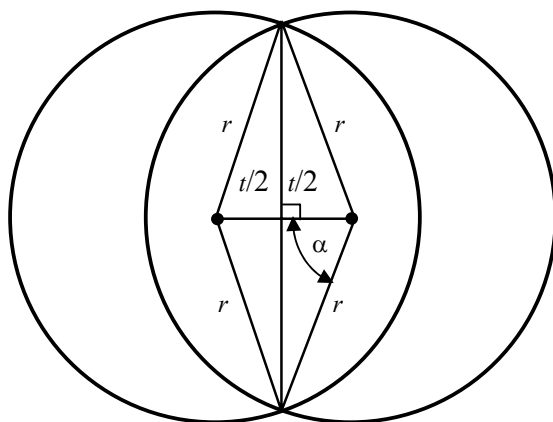
$$r \approx r_j + dNA$$

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

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

(VSS, 20/9/2000, 2)

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



Površina iz katere izhaja svetloba znaša

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

Polovica središčnega kota krožnega izseka znaša

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

Ploščina enega krožnega odseka znaša

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

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

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

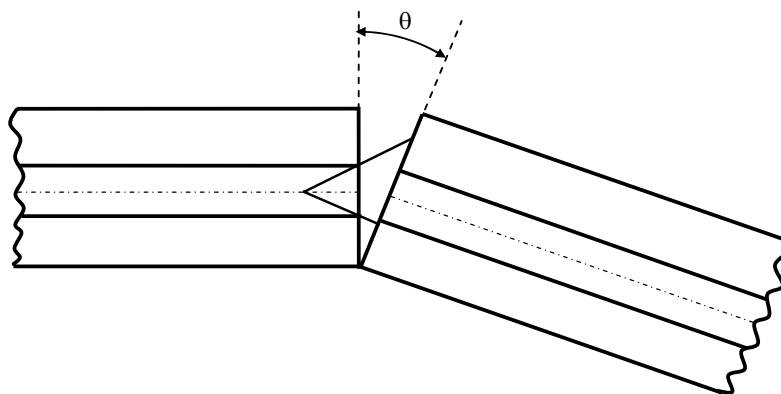
$$\eta = \frac{A_2}{A_1} = \frac{991 \mu\text{m}^2}{1963,5 \mu\text{m}^2} = \underline{50 \%}$$

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

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

(VŠŠ, 19/9/2001, 1)

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

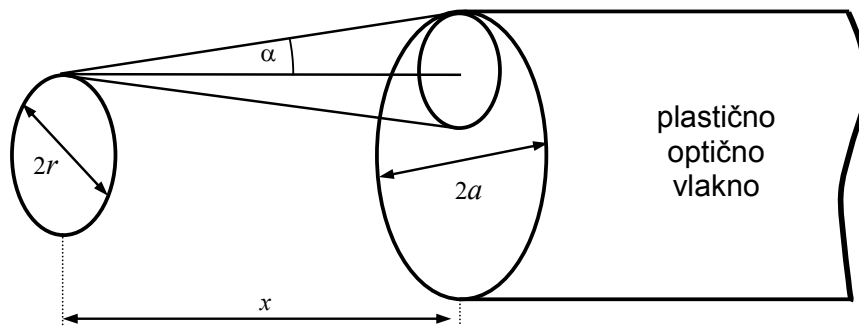


$$\theta \approx \arcsin NA = \arcsin \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \arcsin 0,171 \approx \underline{\underline{10^\circ}}$$

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

(VSS, 5/7/2000, 2)

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



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

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

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

Od tu izračunamo dopusten odmik svetleče diode od jedra vlakna.

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

(VSS, 25/5/2001, 2)

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

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

Ni izgub!

(VSS, 24/9/2003, 2)

Izračunajte slabljenje spoja  $a$  (v dB) dveh različnih mnogorodovnih vlaken. Svetloba najprej potuje po vlaknu s premerom jedra  $d_1=50 \mu\text{m}$  in numerično aperturo  $NA_1=0,2$ . Drugo vlakno s premerom jedra  $d_2=62,5 \mu\text{m}$  in numerično aperturo  $NA_2=0,25$  je zavarjeno na konec prvega vlakna, da so izgube čim manjše in ni neželenih odbojev svetlobe. Obe vlakni imata zunanji premer obloge  $d_0=125 \mu\text{m}$  in imata pri brezhibnem zvaru točno poravnane osi.

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

## 6. Polarizacija

(VŠŠ, 26/6/2002, 2)

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

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

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

## 7. Polarizacijska disperzija

(VSS, 11/10/2002, 2)

Optični signal se širi po  $l=6$  cm dolgem planarnem valovodu v kristalu iz  $\text{LiNbO}_3$ , 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!

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

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

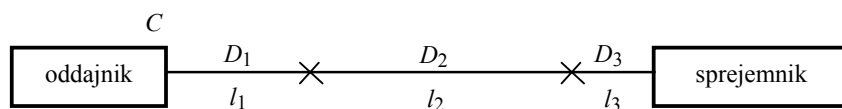
$$\Delta t = t'' - t' = \frac{l}{c_0} (n'' - n') = \frac{6 \cdot 10^{-2} \text{ m}}{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}} (2,2 - 2,05) = \underline{\underline{3 \cdot 10^{-11} \text{ s} = 30 \text{ ps}}}$$



## 8. Kompenzacija disperzije

(VSŠ, 25/5/2001, 5)

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



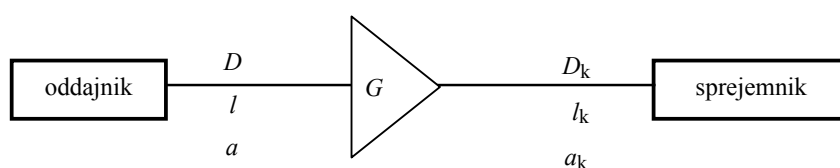
$$\Delta t = (D_1 l_1 + D_2 l_2 + D_3 l_3) \Delta \lambda$$

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

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

(VŠŠ, 2/2/2004, 5)

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



$$l \cdot D + l_k \cdot D_k = 0$$

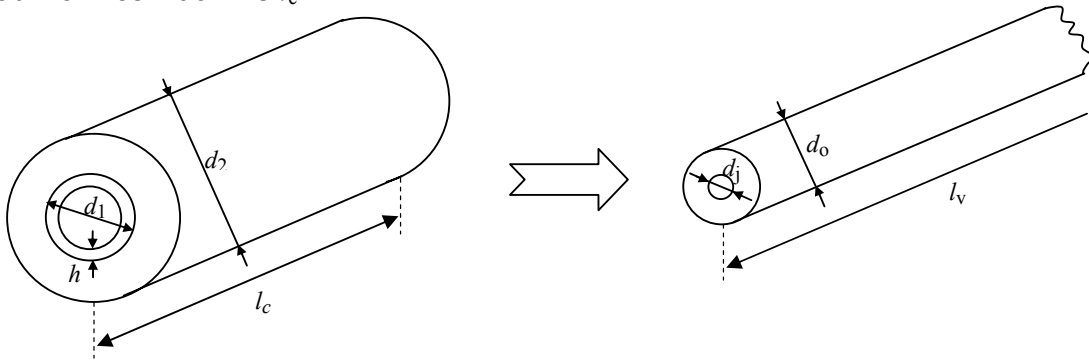
$$l_k = -\frac{l \cdot D}{D_k} = \underline{12,75 \text{ km}}$$

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

## 10. MCVD

(VSS, 25/5/2001, 1)

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



Razmerje površin preseka jedra in obloge znaša:

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

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

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

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

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

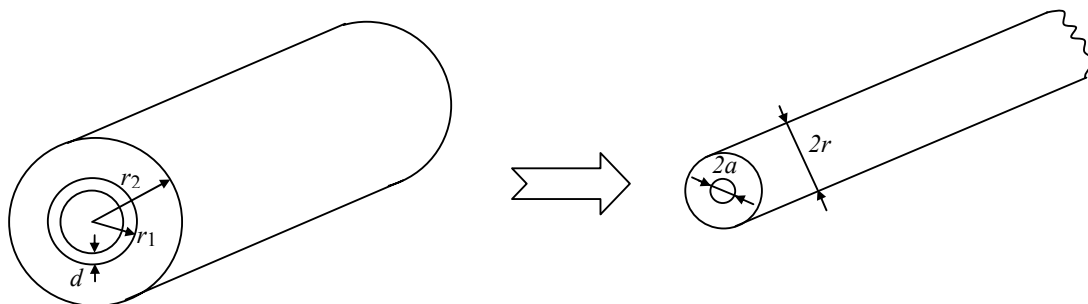
Dolžino dobljenega vlakna dobimo tako, da izenačimo volumne jedra ali obloge.

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

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

(VSS, 24/9/2003, 1)

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



$$V = 2,405; k = \frac{2\pi}{\lambda}; V = kaNA$$

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

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

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

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

(VSS, 29/9/2004, 2)

Svetlobno vlakno izdelamo s tehnologijo MCVD tako, da naneseemo 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  $d_2=25$  mm in notranjim premerom  $d_1=10$  mm. Kolikšna naj bo debelina nanešene plasti  $d$ , da bo imelo izdelano vlakno zunajni premer  $d_v=125$   $\mu\text{m}$  in mejno valovno dolžino enorodovnega delovanja  $\lambda_0=1,2$   $\mu\text{m}$ ?

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

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

Enaka razmerja površin:

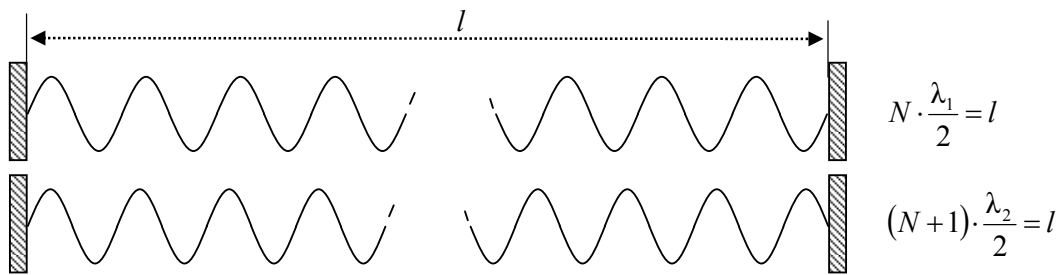
$$\frac{A_{jedra}}{A_{obloge}} = \frac{\pi a^2}{\pi \left( \left( \frac{d_v}{2} \right)^2 - a^2 \right)} = \frac{\pi \left( \left( \frac{d_1}{2} \right)^2 - \left( \frac{d_1 - d}{2} \right)^2 \right)}{\pi \left( \left( \frac{d_2}{2} \right)^2 - \left( \frac{d_1}{2} \right)^2 \right)}$$

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

## 11. Spekter laserja

(VSŠ, 9/4/1999, 3)

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



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

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

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

(VŠŠ, 29/9/2004, 3)

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

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

(VŠŠ, 9/6/1999, 3)

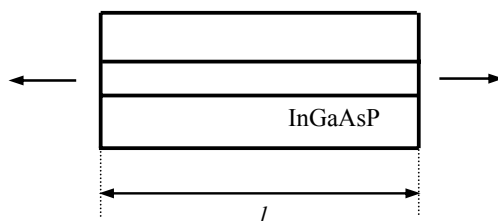
Polprevodniški laser za nazivno valovno dolžino  $\lambda_0=1,3$   $\mu\text{m}$  (v praznem prostoru) ima Fabry-Perot-ov resonator dolžine  $l=200$   $\mu\text{m}$ . Izračunajte razmak med sosednjima spektralnima črtama ( $\Delta\lambda$ ), ko laser niha na več vzdolžnih rodovih! Lomni količnik polprevodnika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

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

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

(VŠŠ, 15/2/2001, 3)

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



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

$f_0 \equiv$  razmik med rodovi

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

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

Laser niha na enem rodu!



(VSŠ, 26/6/2002, 3)

Polprevodniški laser (FP resonator) 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 je dolžina laserskega čipa  $l=1 \text{ mm}$  in znaša povprečni lomni količnik valovoda  $n=3,7$ ? ( $c=3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ )

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

(VŠŠ, 22/1/2003, 3)

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

Širina spektra laserske svetlobe podana v THz znaša:

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

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

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

(VSS, 22/1/2002, 2)

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

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

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

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

(VSS, 2/2/2004, 3)

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

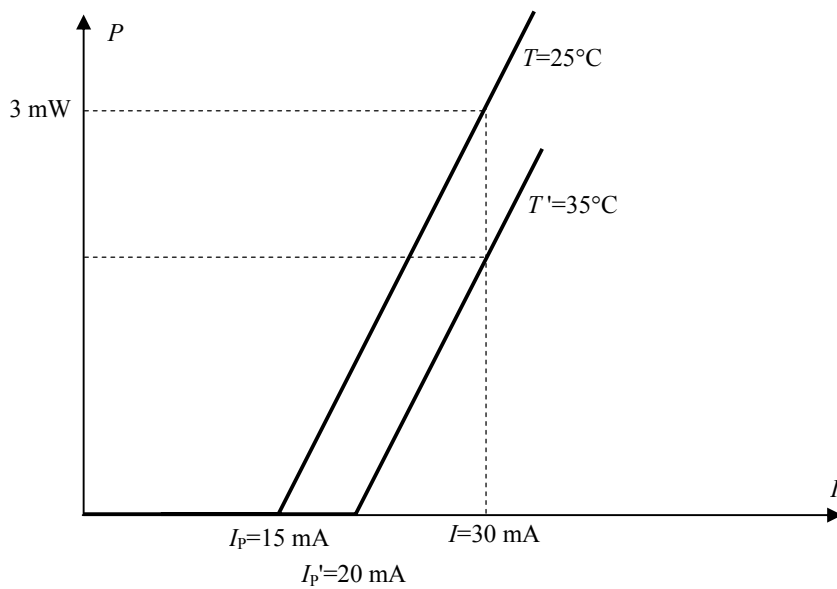
$$\Delta f = N \frac{c_0}{2 l n}$$

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

## 12. Temperaturna odvisnost laserja

(VSŠ, 24/3/2000, 3)

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

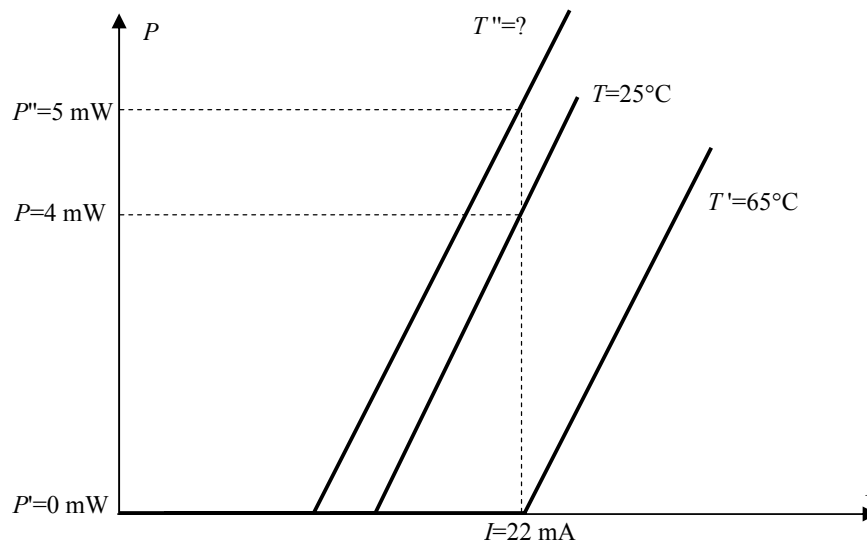


$$\left. \begin{array}{l} P = \alpha(I - I_p); I \geq I_p \\ P' = \alpha(I - I_p'); I \geq I_p' \end{array} \right\} \frac{P'}{P} = \frac{I - I_p'}{I - I_p}$$

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

(VSS, 11/10/2002, 3)

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



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

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

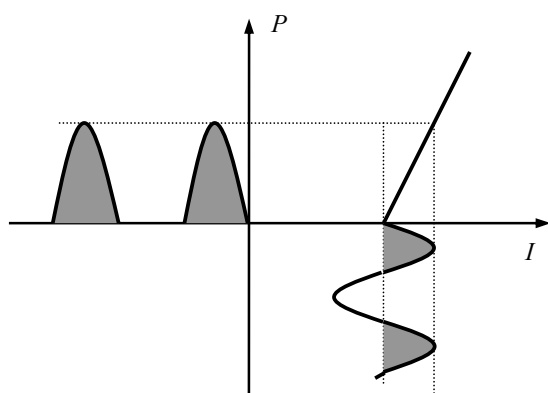
$$P \approx k(I - aT - b) = kI - kb - kaT = \alpha - \beta T \rightarrow \begin{cases} P = 4\text{ mW} = \alpha - \beta \cdot 25\text{ }^{\circ}\text{C} \\ P' = 0\text{ mW} = \alpha - \beta \cdot 65\text{ }^{\circ}\text{C} \end{cases} \left\{ \begin{array}{l} \beta = 0,1\text{ mW}/^{\circ}\text{C} \\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

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

### 13. Laserji splošno

(VSŠ, 5/7/2000, 3)

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



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

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

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

(VSS, 20/9/2000, 3)

Določite izkoristek  $\eta$  svetleče diode, ki daje izhodno svetlobno moč  $P_0=100 \mu\text{W}$  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. ( $c=3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ ,  $h=6,624 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$ )

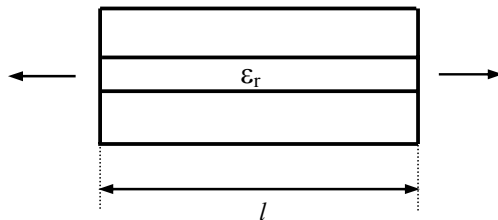
$$P_c = UI = \frac{W}{|Q_c|} I = \frac{hf}{|Q_c|} I = \frac{hcI}{\lambda|Q_c|} = \frac{6,624 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ m/s} \cdot 30 \cdot 10^{-3} \text{ A}}{0,9 \cdot 10^{-6} \text{ m} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ As}} = \underline{\underline{41,4 \text{ mW}}}$$

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



(VSŠ, 25/5/2001, 3)

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



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

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

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

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

(VSS, 19/9/2001, 3)

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

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

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

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

(VŠŠ, 14/3/2003, 3)

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

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

$$P = SA = Sw h$$

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

(VŠŠ, 18/6/2003, 3)

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

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

(VSS, 24/9/2003, 3)

Svetlobni oddajnik vsebuje neposredno moduliran laser in doseže ugasno razmerje  $a=10$  dB. Izračunajte za kolikšno dolžino  $\Delta l$  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 0,35 dB/km pri valovni dolžini  $\lambda=1,3$   $\mu\text{m}$ .

$$a = 10 \text{ dB} = 10$$

$$P_0 = \frac{P_1}{a}$$

$$\frac{(P_1 - 0)}{(P_1 - P_0)} = \frac{P_1}{P_1 - \frac{P_1}{a}} = \frac{a}{a-1} = \frac{10}{9} = 1,11 = \underline{0,453 \text{ dB}}$$

$$\Delta l = \frac{0,453 \text{ dB}}{0,35 \text{ dB/km}} = \underline{\underline{1,294 \text{ km}}}$$

#### 14. Mach-Zehnder-jev elektrooptični amplitudni modulator

(VSŠ, 9/4/1999, 4)

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

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

Iz česar sledi:

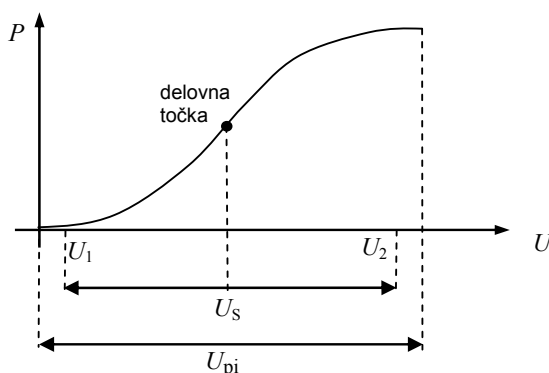
$$U = \frac{U_{\text{pi}}}{\pi} \arccos \left( 2 \cdot \frac{P}{P_0} - 1 \right) = \frac{6 \text{ V}}{\pi} \arccos(2 \cdot 0,8 - 1) = \underline{\underline{1,77 \text{ V}}}$$

(VŠŠ, 1/2/2000, 3)

Optični oddajnik uporablja zunanji elektrooptični modulator z Mach-Zehnder-jevim interferometrom na podlagi  $\text{LiNbO}_3$ , ki ima  $U_{\text{pi}}=6$  V. Določite ugasno razmerje oddajnika ( $P_1/P_0$ ) v dB, če modulator krmilimo z modulacijskim signalom  $U_S=5$  V (vrh-vrh) in je delovna točka modulatorja nastavljena točno na sredino prenosne funkcije modulatorja!

Karakteristika MZM se zapiše kot dvignjeni kosinus

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



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

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

Izdohni optični moči za primer enice in ničle znašata

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

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

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

(VSS, 19/9/2001, 4)

Elektrooptični modulator z Mach-Zehnder-jevim interferometrom na podlagi  $\text{LiNbO}_3$  ima zaradi netočnosti polarizacije vhodne svetlobe ugasno razmerje (razmerje moči enica/ničla)  $a=15$  dB. Izračunajte svetlobno moč enice  $P_1$  in ničle  $P_0$  na izhodu modulatorja, če znaša povprečna svetlobna moč na izhodu modulatorja  $P'=1,5$  mW (50 % enic v podatkih)! Modulator krmilimo z najustreznejšim signalom, ki ustreza  $U_{\text{pTE}}=7$  V.

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

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



(VSS, 22/1/2002, 3)

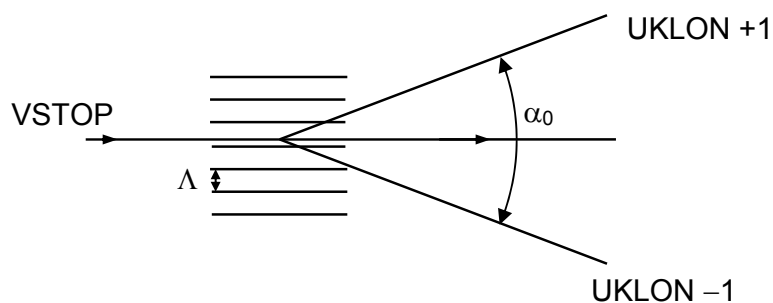
Elektrooptični Mach-Zehnder modulator na LiNbO<sub>3</sub> podlagi ima za TE polarizacijo  $U_{pi}=7$  V. Izračunajte potrebno izhodno moč  $P$  (v dBm) krmilnega električnega ojačevalnika, ki popolnoma izkrmili elektrooptični modulator (največje ugasno razmerje) z električnim signalom pravokotne oblike! Vsi električni priključki so prilagojeni na karakteristično impedanco  $Z_k=50 \Omega$ , delovno točko modulatorja nastavimo na ločeni "bias" elektrodi.

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

## 15. Akustooptika

(VSŠ, 9/6/1999, 5)

Določite frekvenco zvočnega valovanja v akustooptičnem modulatorju svetlobe, da znaša kot med uklonjenima žarkoma prvega reda  $\alpha_0=1^\circ$  (v zraku)! Hitrost zvočnega valovanja v snovi (steklu) znaša  $v=3,5$  km/s, lomni količnik stekla je  $n=1,5$ , kot izvor svetlobe uporabimo HeNe laser ( $\lambda_0=632,8$  nm).



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

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

## 16. Fotodiode

(VSŠ, 9/6/1999, 4)

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

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

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

(VŠŠ, 5/7/2000, 4)

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

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

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

(VŠŠ, 29/9/2004, 4)

Izračunajte tok  $I$  skozi silicijevo fotodiodo, na katero vpada svetlobna moč  $P = 100$  nW z valovno dolžino  $\lambda = 780$  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. ( $c = 3 \cdot 10^8$  m/s,  $h = 6,624 \cdot 10^{-34}$  Js,  $Q_e = -1,6 \cdot 10^{-19}$  As,  $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$  kg)

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

(VSS, 22/1/2002, 4)

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

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

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

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

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

(VSS, 1/2/2000, 4)

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

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

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

Iz tega dobimo vršno napetost.

$$U_1 = Z I_1 = \eta N |Q_e| C Z = 0,75 \cdot 3000 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ As} \cdot 622 \cdot 10^6 \text{ /s} \cdot 1000 \Omega = 224 \mu\text{V}$$

Napetost v primeru ničle je  $U_0 = 0$  V.

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

(VŠŠ, 24/3/2000, 4)

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

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

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

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

(VŠŠ, 20/9/2000, 4)

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

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

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

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

$$N_e = \eta N_f$$

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

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



(VSS, 15/2/2001, 4)

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

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

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

$$U = IR_t$$

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

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

(VSS, 25/5/2001, 4)

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

$$Q = CU_s$$

$$N_e = \frac{Q}{|Q_e|}$$

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

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

$$P_s = WR$$

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

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

(VŠŠ, 26/6/2002, 4)

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

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

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

(VŠŠ, 11/10/2002, 4)

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

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

$$U_{\text{enice}} = U_{\text{šuma}} \sqrt{\frac{P_{\text{enice}}}{P_{\text{šuma}}}} = \underline{99 \mu\text{V}}$$

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

(VSS, 22/1/2003, 4)

PIN-FET modul vsebuje fotodiodo s kvantnim izkoristkom  $\eta_1=70\%$  pri valovni dolžini  $\lambda_1=1,3\ \mu\text{m}$ . Pri tej valovni dolžini znaša občutljivost sprejemnika  $P_1=-35\ \text{dBm}$  za dovolj nizko pogostnost napak *BER*. Kolikšna je občutljivost sprejemnika  $P_2$  na valovni dolžini  $\lambda_2=1,55\ \mu\text{m}$ , kjer kvantni izkoristek fotodiode naraste na  $\eta_2=80\%$ ? Pri računu upoštevamo, da večino šuma povzroča električni ojačevalnik, ki sledi fotodiodi. ( $h=6,624\cdot 10^{-34}\ \text{Js}$ ,  $Q_e=-1,6\cdot 10^{-19}\ \text{As}$ )

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

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

(VŠŠ, 14/3/2003, 4)

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

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

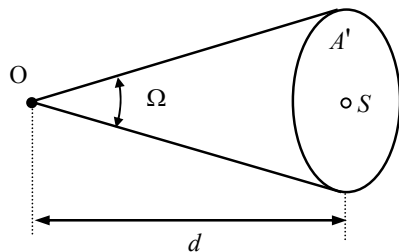
$$|\Gamma| = \frac{n-1}{n+1} = \underline{0,187}$$

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

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

(VSS, 18/6/2003, 4)

Daljinec za televizor vsebuje svetlečo diodo, ki na valovni dolžini  $\lambda=900$  nm sveti z močjo  $P=5$  mW v prostorskem kotu  $\Omega=1$  srd. Izračunajte število fotonov  $N$ , ki v času trajanja enega bita  $T=1$  ms padejo na sprejemno fotodiodo s površino  $A=1$  mm<sup>2</sup> na oddaljenosti  $d=10$  m! ( $h=6,624\cdot 10^{-34}$  Js,  $Q_e=-1,6\cdot 10^{-19}$  As)



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

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

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

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

(VSS, 24/9/2003, 4)

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

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

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

$$U = IR_t$$

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



(VŠŠ, 2/2/2004, 4)

Daljinca za televizor odda sporočilo z zmogljivostjo  $C=1$  kbit/s na valovni dolžini  $\lambda=900$  nm. Svetleča dioda daljinca odda enico z močjo  $P_0=20$  mW enakomerno na vse strani. Televizor na oddaljenosti  $r=5$  m od daljinca je opremljen s silicijevo PIN fotodiodo s površino  $A=1$  mm<sup>2</sup>, kvantnim izkoristkom  $\eta=80$  % in kapacitivnostjo  $C_d=80$  pF. Izračunajte napetost signala  $U_s$  na fotodiodi, ki jo povzroči oddana enica v sporočilu! ( $Q_e=1,6 \cdot 10^{-19}$  As,  $h=6,624 \cdot 10^{-34}$  Js,  $c=3 \cdot 10^8$  m/s)

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

$$U_s = \frac{Q}{C_d} = \frac{\eta |Q_e| P_s}{C_d h f C} = \frac{\eta |Q_e| \lambda P_s}{C_d h c_0 C} = \frac{0,8 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ As} \cdot 900 \cdot 10^{-9} \text{ m} \cdot 63,7 \cdot 10^{-12} \text{ W}}{80 \cdot 10^{-12} \frac{\text{As}}{\text{V}} \cdot 6,624 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ m/s} \cdot 10^3 \text{ s}^{-1}} = \underline{461 \mu\text{V}}$$

(VSS, 9/4/1999, 5)

Povprečna svetlobna moč signala na vhodu sprejemnika znaša  $P_s = -40$  dBm pri bitni hitrosti  $C = 140$  Mbit/s (dvojiški prenos) in valovni dolžini (v praznem prostoru)  $\lambda_0 = 1,3$   $\mu\text{m}$ . Izračunajte število fotonov, ki predstavljajo logično enico, če signal v povprečju vsebuje enako število enic in ničel. Ničlo predstavlja ugasnjen izvor svetlobe. ( $h = 6,624 \cdot 10^{-34}$  Js)

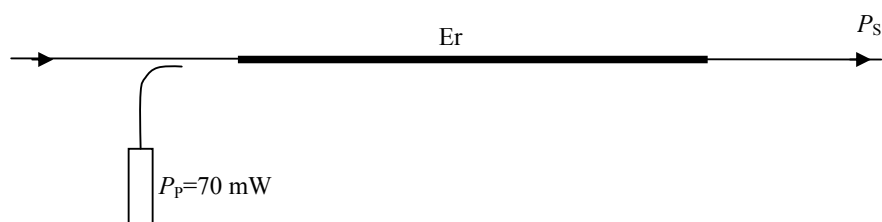
$$P_s = -40 \text{ dBm} = 100 \text{ nW} = 10^{-7} \text{ W}$$

$$N = 2 \cdot \frac{P_s}{CW} = \frac{2P_s}{Chf} = \frac{2P_s \lambda_0}{Chc_0} = \frac{2 \cdot 10^{-7} \text{ W} \cdot 1,3 \cdot 10^{-6} \text{ m}}{140 \cdot 10^6 \text{ /s} \cdot 6,624 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}} = \underline{\underline{9346}}$$

## 17. EDFA

(VSŠ, 1/2/2000, 5)

Optični ojačevalnik z erbijevim vlaknom črpamo z laserjem moči  $P_p=70$  mW na valovni dolžini  $\lambda_p=980$  nm. Določite izhodno moč ojačevalnika  $P_s$  na valovni dolžini signala  $\lambda_s=1550$  nm, če ojačevalnik izkorišča  $\eta=90$  % fotonov črpalke!



$$\Delta W_p = hf_p = \frac{hc_0}{\lambda_p}$$

$$\Delta W_s = hf_s = \frac{hc_0}{\lambda_s}$$

$$P_s = \eta P_p \cdot \frac{\Delta W_s}{\Delta W_p} = \eta P_p \cdot \frac{\lambda_p}{\lambda_s} = 0,9 \cdot 70 \text{ mW} \cdot \frac{980 \text{ nm}}{1550 \text{ nm}} = \underline{\underline{39,8 \text{ mW}}}$$

(VSS, 15/2/2001, 5)

Izračunajte potrebno moč črpalke  $P_c$  laserskega ojačevalnika z erbijevim vlaknom, ki dela na valovni dolžini  $\lambda_c=980$  nm! Od ojačevalnika zahtevamo, da razmeroma šibek vhodni signal z valovno dolžino  $\lambda_s=1550$  nm ojača na izhodno moč  $P_i=25$  mW. Ojačevalnik izkoristi  $\eta=90$  % fotonov črpalke, dodatne izgube sklopa črpalke in izhodnega izolatorja pa znašajo  $a=1$  dB.

$$a = 1 \text{ dB} = 1,259$$

$$P_c = P_i \frac{\lambda_s}{\lambda_c} \cdot \frac{1}{\eta} \cdot a = 25 \text{ mW} \cdot \frac{1550 \text{ nm}}{980 \text{ nm}} \cdot \frac{1}{0,9} \cdot a = \underline{\underline{55,3 \text{ mW}}}$$

(VŠŠ, 11/10/2002, 5)

Erbijev vlakenski optični ojačevalnik črpamo s svetlobo valovne dolžine  $\lambda_c=980$  nm do popolne inverzne naseljenosti energijskih nivojev. Brez vhodnega signala daje ojačevalnik svetlobno moč spontanega sevanja  $P=15$  mW v pasu okoli  $\lambda=1550$  nm. Izračunajte število erbijevih ionov  $N$  v ojačevalnem vlaknu, če spontano sevanje preneha  $t=10$  ms po izklopu črpalke! ( $h=6,624 \cdot 10^{-34}$  Js,  $c=3 \cdot 10^8$  m/s)

$$W = Pt = Nhf = N \cdot \frac{hc_0}{\lambda} \rightarrow N = \frac{Pt\lambda}{hc_0} = \frac{15 \cdot 10^{-3} \text{ W} \cdot 10^{-2} \text{ s} \cdot 1550 \cdot 10^{-9} \text{ m}}{6,624 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}} = \underline{\underline{1,17 \cdot 10^{15}}}$$

(VSS, 24/9/2003, 5)

Laserski ojačevalnik z erbijevim vlaknom doseže izhodno moč  $P=+17$  dBm pri valovni dolžini  $\lambda=1550$  nm. Izračunajte potrebno moč  $P'$  črpalnega laserja na valovni dolžini  $\lambda'=980$  nm, če ojačevalno vlakno izkorišča  $\eta=85$  % fotonov črpalke in znašajo dodatne izgube v izolatorju na izhodu ojačevalnika  $a=0,3$  dB!

$$\underline{P = +17 \text{ dBm} = 50,1 \text{ mW}}$$

$$\underline{a = 0,3 \text{ dB} = 1,072}$$

$$P' = Pa \cdot \frac{\lambda}{\lambda'} \left( \frac{1}{\eta} \right) = \underline{\underline{99,9 \text{ mW} = +20 \text{ dBm}}}$$

## 18. Optične zveze

(VSŠ, 24/3/2000, 5)

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

$$\Delta t = l \cdot \Delta\lambda \cdot D = 100 \text{ km} \cdot 3 \text{ nm} \cdot 18 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km}) = \underline{5,4 \text{ ns}}$$

$$C = \frac{1}{3\Delta t} = \frac{1}{3 \cdot 5,4 \cdot 10^{-9} \text{ s}} = \underline{\underline{61,7 \text{ Mbit/s}}}$$

(VŠŠ, 5/7/2000, 5)

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

$$\Delta t = D\Delta\lambda d = \frac{1}{3C} \rightarrow d = \frac{1}{3CD\Delta\lambda} = \frac{1}{3 \cdot 622 \cdot 10^6 /s \cdot 17 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km}) \cdot 2 \text{ nm}} = \underline{\underline{15,8 \text{ km}}}$$

(VŠŠ, 29/9/2004, 5)

Izračunajte domet  $d$  optične zveze po svetlobnem vlaknu z nekompensiranim disperzijskim koeficientom  $D=17$  ps/(nm·km) pri valovni dolžini  $\lambda=1550$  nm. Oddajnik vsebuje svetlobni izvor s spektralno širino  $B=500$  GHz, svetlobni impulzi pa naj se ne razširijo za več kot  $t_{\max}=1$  ns. ( $c=3 \cdot 10^8$  m/s)

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{c_0} B = 4,0042 \text{ nm}$$

$$l = \frac{\Delta t}{\Delta\lambda D} = \underline{\underline{14,69 \text{ km}}}$$



(VŠŠ, 20/9/2000, 5)

Optična zveza ima zmogljivost  $C_1=155$  Mbit/s in domet  $d_1=100$  km, ki ga določa toplotni šum električnega ojačevalnika za fotodiodo v sprejemniku. Izračunajte domet zveze  $d_2$  z istim oddajnikom in sprejemnikom, če zmogljivost povečamo na  $C_2=622$  Mbit/s! Toplotni šum sprejemnika je premosorazmeren pasovni širini, ostale omejitve dometa zanemarimo, slabljenje vlakna znaša v povprečju  $a=0,35$  dB/km.

$$\Delta a_e = 10 \log \frac{P_{N2}}{P_{N1}} = 10 \log \frac{C_2}{C_1} = \underline{6,035 \text{ dB}}$$

$$\Delta a_0 = \frac{1}{2} \Delta a_e = \underline{3,017 \text{ dB}} \quad \text{ker ne spreminjamo bremenskega upora fotodiode}$$

$$\Delta l = \frac{\Delta a_0}{a} = \underline{8,621 \text{ km}}$$

$$d_2 = d_1 - \Delta l = \underline{\underline{91,4 \text{ km}}}$$

(VSS, 19/9/2001, 5)

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

$$\Delta\lambda = \lambda \cdot \frac{\Delta f}{f_0} = c_0 \cdot \frac{\Delta f}{f_0^2} = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s} \cdot \frac{100 \cdot 10^9 \text{ Hz}}{(194 \cdot 10^{12} \text{ Hz})^2} = \underline{0,8 \text{ nm}}$$

$$\Delta t = D \cdot \Delta\lambda \cdot l = 17 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km}) \cdot 0,8 \text{ nm} \cdot 7000 \text{ km} = \underline{\underline{95 \text{ ns}}}$$

(VŠŠ, 22/1/2002, 5)

Kolikšen sme biti disperzijski koeficient  $D$  (ps/nm·km) enorodovnega vlakna pri valovni dolžini  $\lambda_0=1550$  nm, če zahtevamo, da se pri prenosni hitrosti  $C=2,488$  Gbit/s impulzi ne razširijo za več kot tretjino dolžine enega bita? Širina spektra svetlobnega izvora vključno z modulacijo znaša  $\Delta f=50$  GHz, dolžina zveze pa je  $l=50$  km.

$$\Delta t = \frac{1}{3C} = \underline{134 \text{ ps}}$$

$$\Delta \lambda = \frac{\lambda_0^2 \Delta f}{c_0} = \underline{0,4 \text{ nm}}$$

$$D = \frac{\Delta t}{\Delta \lambda \cdot l} = \frac{134 \text{ ps}}{0,4 \text{ nm} \cdot 50 \text{ km}} = \underline{\underline{6,69 \frac{\text{ps}}{\text{nm} \cdot \text{km}}}}$$

(VSS, 14/3/2003, 5)

Kolikšen sme biti disperzijski koeficient  $D$  (ps/(nm·km)) enorodovnega vlakna pri valovni dolžini  $\lambda=1,3 \mu\text{m}$ , če zahtevamo, da se pri prenosni hitrosti  $C=622 \text{ Mbps}$  impulzi ne razširijo za več kot tretjino trajanja bita? Dolžina zveze je  $l=85 \text{ km}$ , kot izvor svetlobe pa uporabimo mnogorodovni FP laser z dolžino rezonatorja  $l_r=500 \mu\text{m}$ , ki niha na  $N=10$  rodovih. Lomni količnik polprevodniškega čipa znaša  $n=3,7$ . ( $c=3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ )

$$\Delta f = N \cdot \frac{c_0}{2l_r n} = \underline{811 \text{ GHz}}$$

$$\Delta \lambda = \Delta f \cdot \frac{\lambda^2}{c_0} = \underline{4,57 \text{ nm}}$$

$$\Delta t = \frac{1}{3C} = \underline{536 \text{ ps}}$$

$$D = \frac{\Delta t}{l \Delta \lambda} = \underline{1,38 \frac{\text{ps}}{\text{nm} \cdot \text{km}}}$$

(VSS, 26/6/2002, 5)

Kolikšen je domet zveze po vlaknu s koeficientom disperzije  $D=17$  ps/(nm·km) z zmogljivostjo  $C=622$  Mbit/s? Oddajnik uporablja mnogorodovni PF laser s pasovno širino  $\Delta f=300$  GHz pri osrednji frekvenci  $f=194$  THz. Omejitev dometa predstavlja razširitev impulzov, ki ne sme preseči ene tretjine trajanja enega bita. ( $c=3 \cdot 10^8$  m/s)

$$\left| \frac{\Delta \lambda}{\lambda} \right| = \left| \frac{\Delta f}{f} \right| \rightarrow \Delta \lambda = \frac{\Delta f c_0}{f^2} = \underline{2,391 \text{ nm}}$$

$$\Delta t = \frac{1}{3C} = D \Delta \lambda l \rightarrow l = \frac{1}{3CD \Delta \lambda} = \frac{1}{3 \cdot 622 \cdot 10^6 \text{ s}^{-1} \cdot 17 \cdot 10^{-12} \text{ s}/(\text{nm} \cdot \text{km}) \cdot 2,391 \text{ nm}} = \underline{\underline{13,18 \text{ km}}}$$

(VSS, 22/1/2003, 5)

Podmorski prekooceanski kabel sestavlja  $N=100$  odsekov dolžine  $l=50$  km. Odseki vsebujejo enorodovno optično vlakno s slabljenjem  $\alpha=0,22$  dB/km pri valovni dolžini  $\lambda=1,55$   $\mu\text{m}$ . Vsakemu odseku vlakna sledi erbijev laserski ojačevalnik ( $F=3$  dB), ki nadomesti izgube v vlaknu. Izračunajte skupno šumno moč ojačenega spontanega sevanja  $P_{\text{ase}}$  na koncu verige na obeh polarizacijah skupaj, če znaša pasovna širina sistema  $\Delta\lambda=30$  nm! ( $h=6,624\cdot 10^{-34}$  Js,  $c_0=3\cdot 10^8$  m/s)

$$G = \alpha \cdot l = 11 \text{ dB} = \underline{12,6}$$

$$f = \frac{c_0}{\lambda} = \underline{193,5 \text{ THz}}$$

$$\Delta f = \Delta\lambda \frac{f}{\lambda} = \underline{3,75 \text{ THz}}$$

$$F = 3 \text{ dB} \rightarrow \underline{\mu = 1}$$

$$P_{\text{ase}} = 2 N \mu (G - 1) h f \Delta f = \underline{1,11 \text{ mW}}$$

(VSS, 18/6/2003, 5)

Prekooceanski kabel uporablja valvnodolžinski multipleks (WDM) in erbijeve svetlobne ojačevalnike. V prvem pasu valovnih dolžin  $\lambda_1=1530$  nm – 1540 nm uporabljamo  $C_1=2,5$  Gbit/s kanale s kanalskim razmakom  $\Delta f_1=50$  GHz, v drugem pasu  $\lambda_2=1545$  nm – 1565 nm pa  $C_2=10$  Gbit/s kanale s kanalskim razmakom  $\Delta f_2=100$  GHz. Kolikšna je celotna zmogljivost  $C$  kabla z  $N=8$  svetlobnimi vlakni? ( $c=3 \cdot 10^8$  m/s)

$$N_1 = \frac{\Delta\lambda_1 \cdot \frac{c_0}{\lambda_1^2}}{\Delta f_1} = \frac{1273 \text{ GHz}}{50 \text{ GHz}} = 25,46 \Rightarrow \underline{25 \text{ kanalov}}$$

$$N_2 = \frac{\Delta\lambda_2 \cdot \frac{c_0}{\lambda_2^2}}{\Delta f_2} = \frac{2481 \text{ GHz}}{100 \text{ GHz}} = 24,81 \Rightarrow \underline{24 \text{ kanalov}}$$

$$C = N(C_1 N_1 + C_2 N_2) = 8(62,5 \text{ Gbit/s} + 240 \text{ Gbit/s}) = \underline{\underline{2,42 \text{ Tbit/s}}}$$