5. Svetlovodi

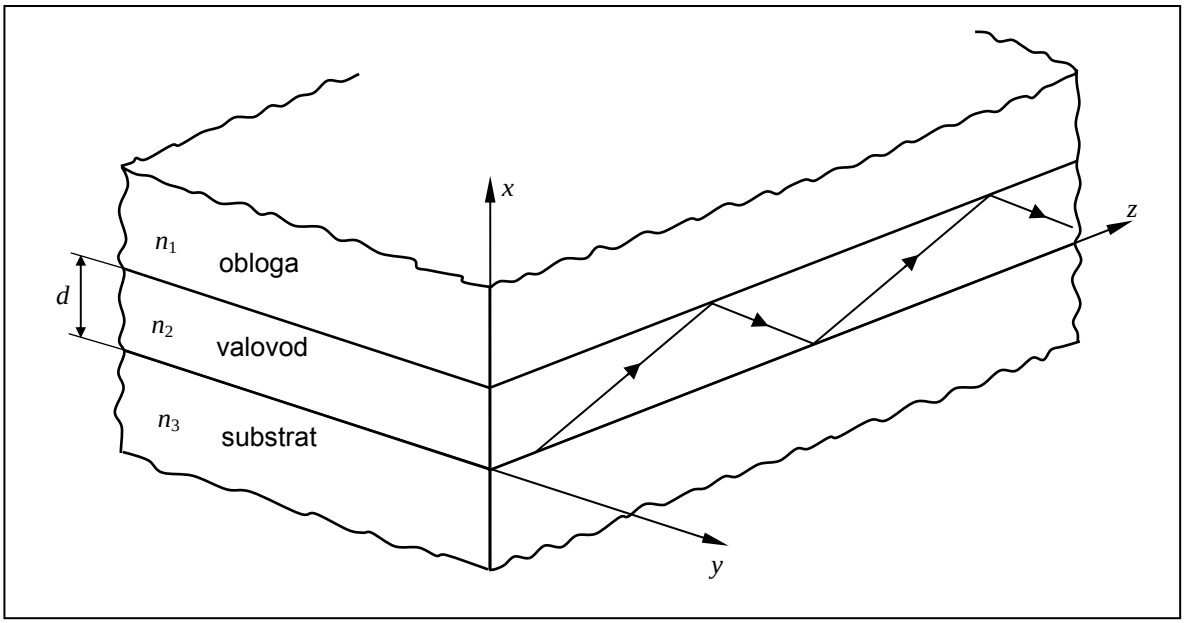
Svetlovodi so dielektrične naprave, ki omogočajo vodenje svetlobe s pomočjo fizikalnega pojava popolnega odboja. Upravljanje svetlobe je brezizgubno, ker je popolni odboj povsem brezizguben pojav. Izgube lahko nastanejo samo ob vstopu in izstopu žarka iz naprave. Žal tudi dielektriki niso brezizgubni in je potovanje svetlobe skozi dielektrik deležno izgub, ki pa so v večini primerov zelo majhne v primerjavi z ostalimi prenosnimi potmi. Dielektrike lahko oblikujemo v različne oblike naprav za vodenje svetlobe. Po obliki svetlovode v osnovi ločimo na planarne in krožnosimetrične.

5.1. Planarni svetlovod

V tem poglavju obravnavamo valovanja v tankoplastnih strukturah. Predstavljeni so le valovodni pojavi in lastnosti tankoplastnih svetlovodov. Ob tem ne smemo prezreti velikega tehnološkega pomena tankoplastnih struktur za razvoj prihodnjih visokih optičnih tehnologij. To so zlasti integrirana optična vezja najrazličnejših namembnosti, ki podobno kot v elektroniki ali na mikrovalovih združujejo veliko število različnih elementov oziroma opravljajo specifične funkcije.

Na sliki 1 je predstavljen tankoplastni svetlovod, ki je izveden kot planarni valovod iz treh ravnih dielektričnih plasti z različnim lomnim količnikom. Bistveno lastnost strukture ohranimo, nalogo pa bistveno poenostavimo, če predpostavimo, da je struktura neomejena v smeri osi y.

Struktura ima lahko različne lomne like. Stopničast lomni lik ustreza trem diskretnim dielektričnim plastem različnega lomnega količnika n_1, n_2 in n_3. Namesto skokovitega prehoda ima lahko zvezno potekajoč (gradientni) lomni lik v eni ali več plasteh, ki je odvisen od koordinate x.



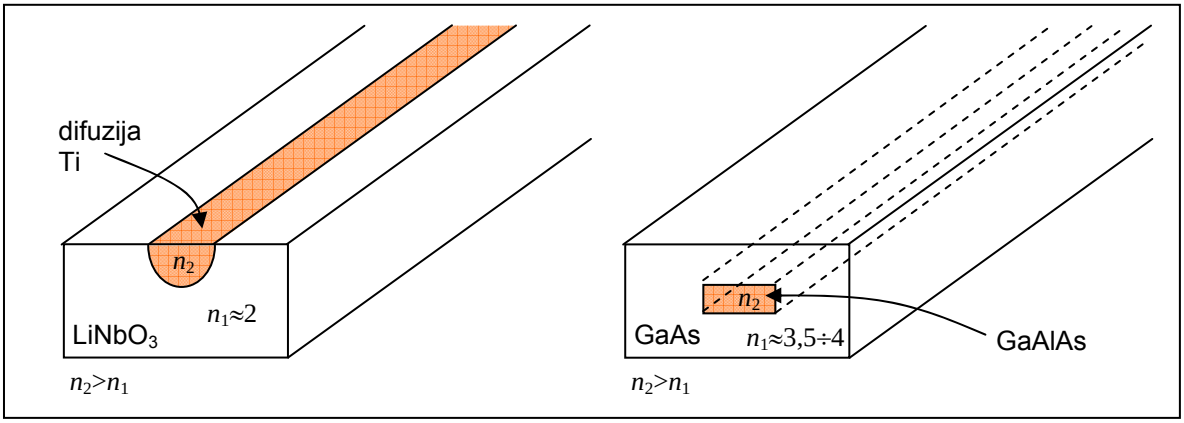
Slika 1: Tankoplastni svetlovod.

V praktični izvedbi je tankoplastni planarni valovod na sliki 1 izveden tako, da dielektrična podloga (substrat) služi kot spodnja obloga, na kateri je po določenem postopku izdelana tanka dielektrična plast (film), ki predstavlja jedro. Zgornja obloga je zrak nad filmom. Da zagotovimo popolni notranji odboj, mora biti lomni količnik n_2 jedra večji od lomnih količnikov n_1 in n_3 zgornje in spodnje obloge. Torej izberemo $n_2 > n_1$ in $n_2 > n_3$.

V praksi srečamo planarni svetlovod največkrat izdelan iz litijevega niobata ($LiNbO_3$) ali polprevodnika.

Kristali litijevega niobata imajo za optične valovode zanimive lastnosti, saj omogoča izdelavo nelinearnih optičnih elementov, kot so na primer optični modulatorji. V kristal litijevega niobata se s pomočjo postopka difuzije vnese manjšo količino titana (Ti), ki predstavlja svetlovod, kot prikazuje slika 2a.

V polprevodnikih, kot je na primer GaAs, ki ga prikazuje slika 2b, se s postopkom dopiranja vnese manjšo količino aluminija, ki povzroči povečanje lomnega količnika. Takšen svetlovod predstavlja valovodni resonator v polprevodniških laserjih.



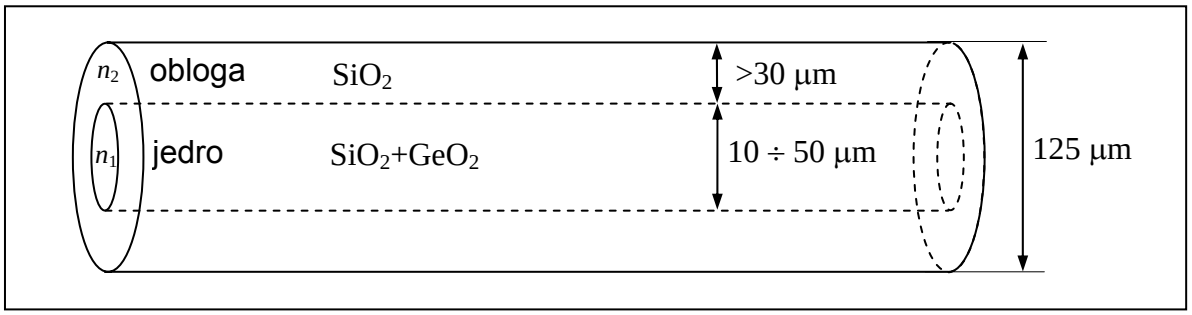
Slika 2: Primer praktične izvedbe planarnega svetlovoda na $LiNbO_3$ in polprevodniku.

5.2. Krožnosimetrični svetlovod

Sprva so bila optična vlakna sestavljena samo iz enotnega homogenega stekla. Pri uporabi takšnih optičnih vlaken je prihajalo do mnogih težav saj vlakno ni imelo konstantnih zunanjih razmer v celotni zunanjosti. Leta 1954 je Nizozemec Abraham van Heel predlagal uporabo še ene dodatne plasti silicijevega stekla - obloge. S tem je onemogočil vpliv vode in umazanije na popolni notranji odboj.

Danes se uporablja dvoplastno vlakno, ki je svetlovod, sestavljen iz valjastih dielektričnih plasti nekoliko različnega lomnega količnika. Lomni količnik plasti je lahko konstanten (vlakno stopničastega lomnega lika) ali spremenljiv (gradientno vlakno).

Srednji vodnik polmera a in lomnega količnika n_1 imenujemo jedro vlakna. Obdajajočo plast imenujemo obloga. Razlika lomnih količnikov obeh plasti je izredno majhna.



Slika 3: Krožnosimetrični svetlovod.

Lomni količnik obloge (n_2), ki je iz SiO_2, znaša 1,46.

GeO_2 skušamo dodati čimmanj, ker se svetloba na germaniju sipa, kar vnaša dodatno slabljenje. Zato je GeO_2 dodanega le toliko, da je lomni količnik jedra (n_1) za procent večji od lomnega količnika obloge.

$$n_1 \approx n_2 + 1\% \cdot n_2 = 101\% \cdot n_2 . \tag{1}$$

Lomni parameter Δ dvoplastnega stopničastega vlakna je definiran kot relativna razlika lomnih količnikov in ga pri zelo majhni razliki (šibkolomno vlakno) pišemo takole

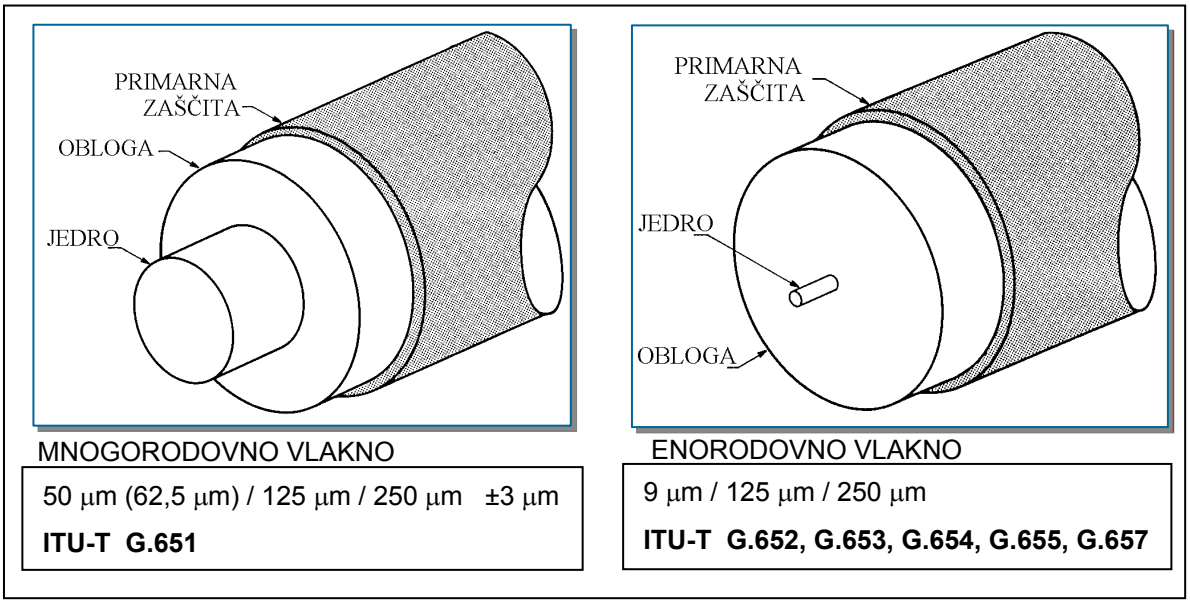
$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} = \frac{(n_1 - n_2)\cdot(n_1 + n_2)}{2n_1^2} \approx \frac{(n_1 - n_2)\cdot(2n_1)}{2n_1^2} = \frac{n_1 - n_2}{n_1} . \tag{2}$$

Približek lahko zapišemo, ker je običajna vrednost parametra Δ od 0,001 do 0,01. Vrednost parametra se zato bistveno ne spremeni, če v imenovalec uvrstimo vrednosti n_1 ali n_2.

$$\Delta \approx \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_2^2} \approx \frac{n_1 - n_2}{n_2} . \tag{3}$$

Tovrstni svetlovod imenujemo **šibkolomno optično vlakno**. Kritični kot θ_k za popolni odboj se pri tem zelo približa $\pi/2$.

Glavno pozornost bomo namenili dvoplastnemu vlaknu stopničastega lomnega ali gradientnega lomnega lika. Na sliki 4 so prikazane standardne izmere nekaterih vlaken v mikrometrih. Štejemo, da so za široko porabo najprimernejša mnogorodovno gradientno vlakno 50/125 in zlasti enorodovno stopničasto ali gradientno vlakno 9/125.



Slika 4: Standardni primeri dvoplastnih optičnih vlaken.

Optična vlakna uporabljamo kot dielektrične valovode. Ker je valovna dolžina svetlobe zelo majhna, so zelo majhne tudi prečne izmere ustreznih valovodov. Optična vlakna za komuniciranje so izdelana iz zelo čistega kremenčevega stekla in njihov zunanji premer je standardiziran na 125 μm. Za lažje rokovanje so optična vlakna zaščitena vsaj s primarno zaščito premera 250 μm in običajno še s sekundarno zaščito različnih premerov. Za zaščito steklenih optičnih vlaken se uporabljajo umetne plastične mase.

V osnovi poznamo dva različna tipa vlaken: enorodovno in mnogorodovno vlakno.

Pri enorodovnem vlaknu ima jedro premer samo 9 μm in dovoljuje širjenje samo enega rodu svetlobnega valovanja. Standardno enorodovno vlakno je dimenzionirano za prenos pri 1300 nm. Disperzijsko premaknjeno vlakno pa je dimenzionirano za prenos pri 1550 nm. To omogoča aplikacije od lokalnih pristopnih omrežij (analognih in digitalnih) do dolgih visokokapacitetnih zvez.

Pri mnogorodovnem vlaknu je premer jedra skoraj polovica celotnega premera in znaša 50 μm ali 62,5 μm. Dovoljuje širjenje nekaj sto rodovom svetlobnega valovanja. Večja velikost jedra omogoča lažje

spajanje vlaken in usmerjanje svetlobe iz izvorov (LED, VSCEL, laser,…). Čeprav se uporaba mnogorodovnega vlakna krči na uporabo v lokalnih omrežjih in računalniških omrežjih, se razvoj mnogorodovnega vlakna ni ustavil. Trend je predvsem v izboljšanju proizvodnih toleranc za področje 850 nm (VCSEL). Mnogorodovno vlakno je ključno za tehnologijo Gigabitnega etherneta.

Tako enorodovno kot tudi mnogorodovno vlakno imata zunanjo oblogo, ki jo imenujemo primarna zaščita in služi za izboljšanje mehanskih lastnosti vlakna.