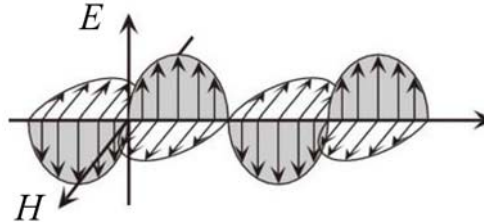


### 3. Uvod v elektromagnetno valovanje

V naravi poznamo dve vrsti valovanja: longitudinalno (vzdolžno) valovanje in transverzalno (prečno) valovanje. Elektromagnetno valovanje spada med transverzalno valovanje.

Elektromagnetno valovanje je skozi prostor samo razširjajoče valovanje z električno in magnetno komponento. Električno in magnetno polje valujeta pravokotno eno na drugo in vzdržujeta druga drugo. V prostoru se elektromagnetno valovanje širi pravokotni na smer električnega in magnetnega polja s hitrostjo svetlobe v smeri.



Slika 1: Elektromagnetno valovanje je sestavljeno iz električnega in magnetnega polja.

Vsak električni naboj, ki se giblje pospešeno, seva elektromagnetno valovanje, ki se od izvora oddaljuje s hitrostjo svetlobe. Kadar po žici ali kateremkoli drugem električnem vodniku teče izmenični električni tok, deluje ta kot antena in seva elektromagnetno valovanje, ki ima enako frekvenco, kot je frekvenca toka skozi vodnik.

Elektromagnetno valovanje se obenem obnaša kot valovanje in kot curek fotonov, čemur pravimo valovno-delčni dualizem. Kadar opisujemo elektromagnetno valovanje kot valovanje, ga opišemo s hitrostjo razširjanja (ki je enaka hitrosti svetlobe) ter valovno dolžino ali frekvenco.

$$c_0 = \lambda_0 f . \quad (1)$$

Ko pa ga opisujemo kot curek delcev, podamo njihovo energijo  $W$ ; to Planckova zveza povezuje s frekvenco  $\nu$ :

$$W = h \cdot \nu . \quad (2)$$

Pri tem je  $h$  Planckova konstanta  $h=6,626 \cdot 10^{-34}$  Js.

Periodično spreminjajoče veličine (harmonično valovanje) v fiziki in še posebno v elektrotehnikah si predstavljamo in lahko zapišemo na dva načina: v časovnem prostoru in frekvenčnem prostoru.

$$u(t) = A \cos(\omega t + \varphi) = \operatorname{Re} \left[ \hat{U} e^{j\omega t + \varphi} \right] \quad (3)$$

Harmonično funkcijo  $u(t)$  lahko preslikamo v kompleksni frekvenčni prostor  $F$ , kar imenujemo kompleksna amplituda ali kompleksor. S tem se operator odvajanja in integriranja po času spremeni v operator množenja oziroma deljenja s faktorjem  $j\omega$ .

Električno poljsko jakost zapišemo s kazalcem  $\vec{E}$ .

Magnetno poljsko jakost zapišemo s kazalcem  $\vec{H}$ .

Najprej si pogledjmo kako se elektromagnetno valovanje širi po **brezizgubni snovi**.

Brezizgubna snov ima neko dielektričnost  $\epsilon$ , neko magnetno permeabilnost  $\mu$  in prevodnost enako nič (ni kovina)  $\gamma=0$ .

Če predpostavimo spremembo samo v smeri  $z$ , se glasita valovni enačbi za električno in magnetno polje

$$\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial z^2} + \omega^2 \mu \epsilon \vec{E} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial z^2} + \omega^2 \mu \epsilon \vec{H} = 0 \quad (5)$$

Rešitev je potujoči val

$$\vec{E} = \vec{E}_0 e^{\pm jkz} \quad (6)$$

s sledečimi lastnostmi:

1. Električno polje mora biti pravokotno na smer širjenja valovanja  $\vec{E} \perp \vec{I}_z$
2. Magnetno polje mora biti pravokotno na električno polje  $\vec{H} \perp \vec{E}$  in pravokotno na smer širjenja valovanja  $\vec{H} \perp \vec{I}_z$
3. pozitivni predznak pomeni potovanje nazaj, negativni predznak pomeni potovanje naprej

$$\vec{E}(t, z) = \text{Re}[\vec{E}_0 e^{-jkz} e^{j\omega t}] \quad (7)$$

$$\vec{E}(t, z) = \text{Re}[\vec{E}_0 e^{j(\omega t - kz)}] \quad (8)$$

Z naraščanjem časa  $t$  mora naraščati tudi  $z$ , če želimo ohraniti konstanten argument (konstantno fazo) in se pomikati na valu, ki potuje v smeri osi  $z$  s hitrostjo  $c$ .

$$\frac{1}{\sqrt{\mu\varepsilon}} = \frac{\omega}{\omega\sqrt{\mu\varepsilon}} = \frac{\omega}{k} = \frac{z}{t} = c \quad (9)$$

V praznem prostoru ( $\varepsilon_0, \mu_0, \gamma=0$ ) znaša ta hitrost

$$c_0 = \frac{1}{\sqrt{\mu_0\varepsilon_0}} \quad (10)$$

kjer je magnetna permeabilnost

$$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}} \quad (11)$$

svetlobna hitrost

$$c_0 = 2,9998 \cdot 10^8 \text{ m/s} \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m/s} \quad (12)$$

dielektrična konstanta

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot 9 \cdot 10^{-9}} \frac{\text{As}}{\text{Vm}} = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{As}}{\text{Vm}} \quad (13)$$

### 3.1. Svetloba kot elektromagnetno valovanje

Svetloba je elektromagnetno valovanje, torej prečno (transverzalno) valovanje. Lastnosti snovi pri svetlobnih frekvencah določa v glavnem **dielektričnost**, saj je magnetna permeabilnost večine snovi enaka permeabilnosti praznega prostora pri svetlobnih frekvencah. Dielektričnost običajno edina določa hitrost razširjanja svetlobe v snovi, ki jo podajamo z lomnim količnikom, ter valovno impedanco snovi.

V snovi ( $\varepsilon \neq \varepsilon_0, \mu \neq \mu_0, \gamma=0$ ) znaša ta hitrost

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_r \mu_0 \varepsilon_r \varepsilon_0}} = \frac{c_0}{\sqrt{\mu_r \varepsilon_r}} = \frac{c_0}{n} \quad (14)$$

Ker je  $\mu_r \geq 1$  in  $\varepsilon_r \geq 1$  znaša  $c \leq c_0$ .

Pri razširjanju svetlobe v snovi je njena hitrost odvisna od optične gostote sredstva. Hitrost razširjanja svetlobe v različnih medijih je različna. Najhitreje se razširja v vakuumu 300.000.000 m/s, v zraku se upočasni za 0,03%, v vodi za 1/4, v steklih odvisno od sestave za okoli 1/3.

### 3.2. Karakteristična impedanca prostora

Električna poljska jakost in magnetna poljska jakost sta povezani preko karakteristične impedance prostora

$$H = \frac{E}{Z} \quad (15)$$

pri čemer je

$$Z = \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_r}{\epsilon_0 \epsilon_r}} = Z_0 \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \quad (16)$$

kjer je  $Z_0 = 120\pi \Omega$  karakteristična impedanca praznega prostora.

V primeru potovanja valovanja po dielektriku  $\mu_r = 1$ , znaša karakteristična impedanca prostora

$$Z = \frac{Z_0}{\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{Z_0}{n} \quad (17)$$

### 3.3. Poyntingov vektor

Poyntingov vektor predstavlja smer in velikost elektromagnetnega valovanja

$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H} \quad (18)$$

Gostoto oziroma jakost energijskega toka, ki se podaja v  $\text{W/m}^2$ , se izračuna kot časovno povprečje Poyntingovega vektorja

$$S = \frac{EH}{2} = \frac{E^2}{2Z} = \frac{H^2 Z}{2} \quad (19)$$

Moč in jakost povezuje ploščina

$$S = \frac{P}{A} \quad (20)$$

#### Primer:

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

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

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

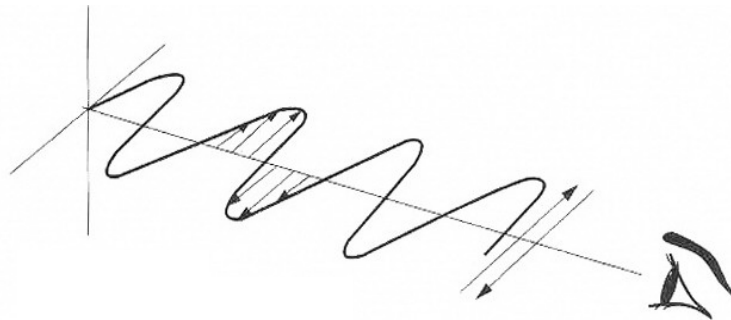
$$E = \sqrt{2ZS} = \underline{256 \text{ kV/m}}$$

### 3.4. Polarizacija svetlobe

O polarizaciji lahko govorimo samo pri transversalnem valovanju (npr. elektromagnetno valovanje), pri katerem je valovni vektor pravokoten na smer širjenja valovanja. Valovni vektor in vektor smeri valovanja ležita v ravnini, ki jo imenujemo **nihajna ravnina** valovnega vektorja.

Pri longitudinalnem valovanju (npr. zvok) leži valovni vektor v smeri širjenja valovanja in ne more definirati nihajne ravnine. Elektromagnetno valovanje je prečno (tranzverzalno) valovanje. Pri vseh prečnih valovanjih moramo za točen opis valovanja poleg jakosti, frekvence in faze polja navesti tudi polarizacijo.

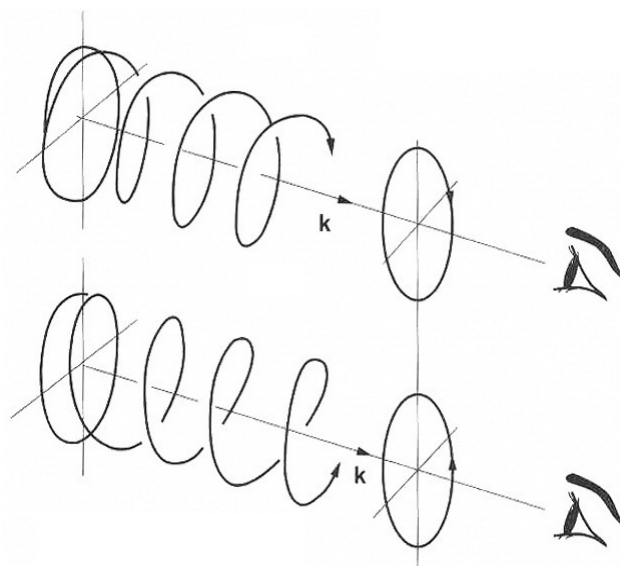
Valovanje je **linearno polarizirano**, če valovni vektor med širjenjem valovanja ves čas niha v isti ravnini, to je, če se nihajna ravnina valovnega vektorja ne spreminja. Ravnina, ki je pravokotna na nihajno ravnino se imenuje **polarizacijska ravnina** linearno polariziranega valovanja, kot to prikazuje slika 2.



Slika 2: Linearno (horizontalno) polarizirana svetloba.

Elektromagnetno valovanje je sestavljeno iz valovnih vektorjev E (jakost električnega polja) in H (jakost magnetnega polja), ki sta pravokotna drug na drugega in pravokotna na smer širjenja valovanja. Za svetlobni učinek elektromagnetnega valovanja je odločilna predvsem električna komponenta valovanja, zato obravnavamo le njo. Nihajna ravnina linearno polarizirane svetlobe je zato nihajna ravnina valovnega vektorja E. Vektor H niha v polarizacijski ravnini električne komponente valovanja.

Poleg linearno polariziranega valovanja je pomembno še **eliptično polarizirano valovanje**, pri katerem se smer valovnega vektorja med širjenjem enakomerno vrti okrog smeri širjenja valovanja, tako, da vektorji valovanja popisujejo nekakšno vrtečo se vijačno ploskev, kot prikazuje slika 3. Gledano v smeri širjenja valovanja, se valovni vektor vrti tako, da njegova konica potuje po elipsni krivulji, kar pomeni, da se spreminja tudi njegova amplituda.

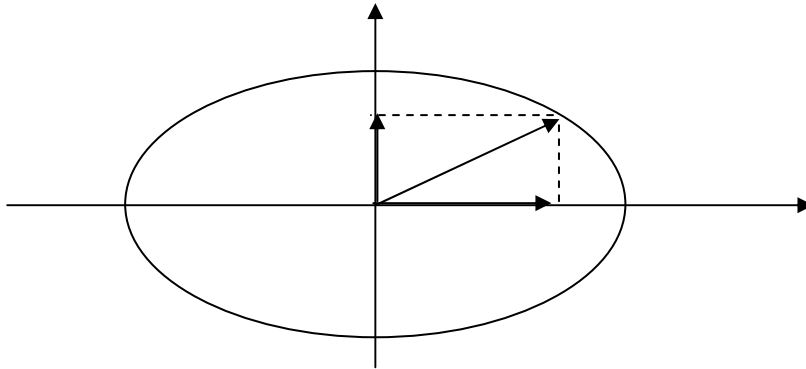


Slika 3: Krožno (desnosučno in levosučno) polarizirana svetloba.

Glede na smer vrtenja valovnega vektorja ločimo desnosučne in levosučne eliptično polarizirano valovanje. Pri desnosučnem valovanju se valovni vektor vrti v smeri vrtenja urnega kazalca (gledano v smeri širjenja valovanja), pri levosučnem pa obratno.

Poseben primer eliptično polariziranega valovanja je krožno polarizirano valovanje; amplituda valovnega vektorja se med vrtenjem ne spreminja, konica valovnega vektorja potuje po krožnici.

Kakor lahko kroženje (ali v splošnem gibanje po tirnici elipse) sestavimo iz dveh pravokotnih nihanj, si lahko tudi mislimo, da je eliptično polarizirano valovanje sestavljeno iz dveh linearno polariziranih valovanj z enakima frekvencama, katerih nihajni ravnini sta pravokotni druga na drugo.

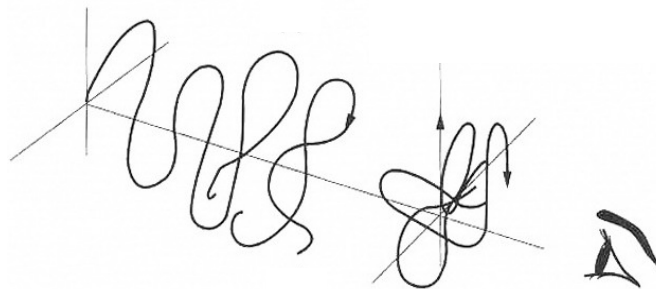


Slika 4: Sestavljanje eliptične polarizacije iz dveh linearnih pravokotnih polarizacij.

Tudi obrano velja: linearno polarizirano valovanje je sestavljeno iz dveh krožno polariziranih valovanj (enaki frekvenci), ki se vrtita v nasprotnih smereh (to je iz desnosučnega in levosučnega).

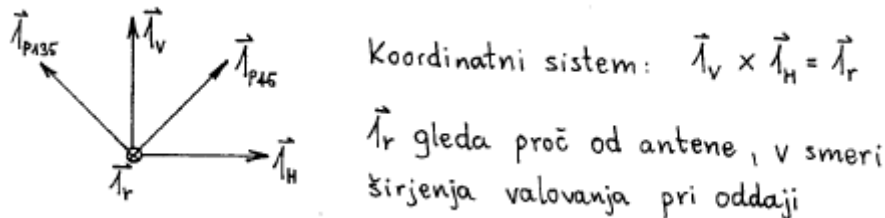
Če se nihajna ravnina spreminja s časom naključno, ni nobene izjemne smeri nihanja električnega polja, pa je valovanje **nepolarizirano**; amplituda valovne količine je enaka v katerikoli smeri. Takšno valovanje je pravzaprav množica medsebojno nepovezanih linearno polariziranih valovanj, katerih nihajne ravnine so neurejeno usmerjene. Nepolarizirano valovanje je v vseh nihajnih smereh enako močno. Shematsko ga predstavimo s pravokotnima puščicama, s katerima povemo, da so polarizirana valovanja z nihajno ravnino v dani smeri enako močno zastopana kot valovanja z nihajno ravnino v pravokotni smeri. Pomembno je še, da med njimi ni fazne povezave.

Nepolarizirano svetlobo oddajajo segreta oziroma razžarjena telesa, tudi sončna svetloba je nepolarizirana. Segreto telo vsebuje veliko atomskih izvorov, ki oddajajo elektromagnetno valovanje neodvisno drug od drugega. Med njimi ni fazne povezave, vsak atom oddaja valovanje z drugačno nihajno ravnino. Tudi posamični atomi ne oddajajo ves čas enakih valov. Saj vemo, da oddajajo valovne pakete, ki si sledijo v različnih časovnih presledkih in med katerimi ni povezave. Ravno tako je nepolarizirana svetloba, ki jo oddajajo različne fosforescenčne svetilke, oziroma, ki nastane z razelektrenjem v plinih. Izjema so laserska svetila, njihova svetloba je pretežno linearno polarizirana.



Slika 5: Nepolarizirana svetloba.

Da lahko s polarizacijo tudi računamo, je smiselno uvesti primeren koordinatni sistem in poljubno polarizirano polje razstaviti na poznane komponente. Pri elektromagnetnih izvori si pri določanju polarizacijskih lastnosti definiramo koordinatni sistem kot je prikazano na sliki 6. Smerni vektor vertikalne komponente  $\vec{1}_V$  kaže navzgor, smerni vektor horizontalne komponente  $\vec{1}_H$  pa je tako obrnjen, da kaže njun vektorski produkt v smeri razširjanja valovanja  $\vec{1}_r$  v oddajnem režimu, to je proč od antene. Na ta način je koordinatni sistem enako definiran ne glede na to, če dela oddajna antena v sprejemnem ali oddajnem režimu.



Slika 6. Definicija koordinatnega sistema za določanje polarizacijskih lastnosti.

Enotni vektorji za ortogonalni poševni polarizaciji pod kotoma  $45^\circ$  in  $135^\circ$  znašajo

$$\vec{1}_{P45} = \frac{\vec{1}_V + \vec{1}_H}{\sqrt{2}} \quad \vec{1}_{P135} = \frac{\vec{1}_V - \vec{1}_H}{\sqrt{2}}$$

Enotni vektorji za krožni polarizaciji (levo in desno) pa znašajo

$$\vec{1}_L = \frac{\vec{1}_V + j\vec{1}_H}{\sqrt{2}} \quad \vec{1}_D = \frac{\vec{1}_V - j\vec{1}_H}{\sqrt{2}}$$

Pri polarizaciji elektromagnetnega valovanja vedno navajamo le smer vektorja električnega polja. V področju daljnega polja antene je z vektorjem električnega polja točno določena tudi smer in velikost vektorja pripadajočega magnetnega polja.

Poljubno polarizirano valovanje izrazimo kot vsoto dveh znanih ortogonalnih komponent: vertikalne in horizontalne ali pa desne krožne in leve krožne komponente. Pri razstavljanju na komponente ne smemo pozabiti, da je kvadrat velikosti vektorja s kompleksnimi komponentami dan s skalarnim produktom vektorja z njegovo konjugirano-kompleksno vrednostjo.

$$\vec{E} = \vec{1}_L E_L + \vec{1}_D E_D$$

$$E_L = \vec{E} \cdot \vec{1}_L^* \quad E_D = \vec{E} \cdot \vec{1}_D^*$$

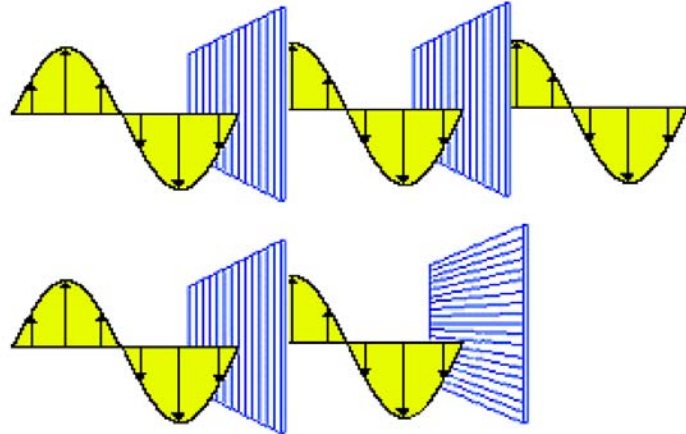
Razmerje krožnih komponent označimo s črko Q.

$$Q = \frac{E_L}{E_D}$$

Q je kompleksno število, ki nam povsem točno opiše polarizacijske lastnosti valovanja. Q lahko naravnost izmerimo tako, da polje sprejemamo z dvema antenama, ena desno in druga levo polarizirani. Sprejeta signala vodimo na kvocientni merilnik, ki izmeri razmerje amplitud ter medsebojno fazo.

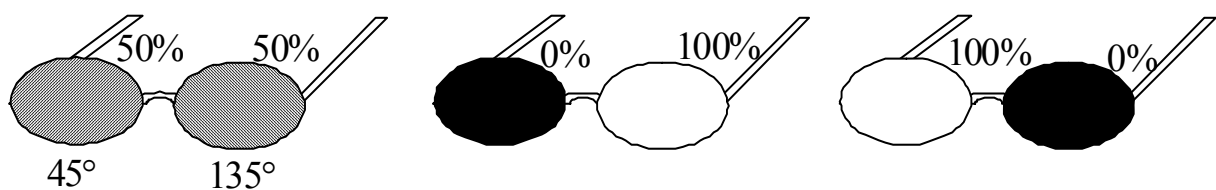
### 3.4.1. Polarizator in analizator

Polarizator je material, ki prepušča svetlobo le v ravnini pod določenim kotom, ki ga določa sestava snovi. Če postavimo dva polarizatorja enega za drugim tako da sta njihovi optični osi paralelni, potem gre svetloba skozi oba, kot prikazuje slika 7a. Če ju postavimo tako da sta njihovi optični osi pravokotni druga na drugo, kot prikazuje slika 7b, potem ne pride nič svetlobe skozi. Če sta polarizatorja postavljena drug na drugega pod kotom od  $0^\circ$  do  $90^\circ$ , je jakost svetlobe funkcija kota. Ta pojav se uporablja na primer pri sončnih očalih, da prepuščajo manj svetlobe.



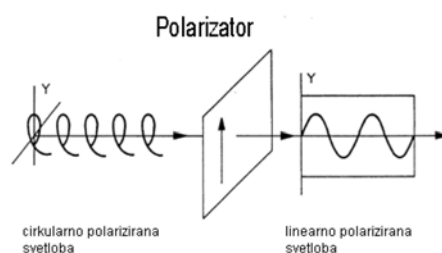
Slika 7: Prepuščanje in blokiranje svetlobe pri prehodu skozi polarizator.

Pojav se uporablja tudi pri 3-D prikazovalnikih, kjer so prikazani dve rahlo različni 2-D sliki, po vsaka za eno gledalčevo oko. Ti dve, z različnimi očesi, sprejeti sliki se v možganih interpretirata kot ena 3-D slika. Ti dve ločeni različni sliki je mogoče prikazati na več različnih načinov, pri čemer je najbolj običajna uporaba očal. Pri enem načinu prikazovalnik polarizira sliki in polarizator v očalih zagotovi, da prava slika pride do pravega očesa. V drugem načinu so očala uporabljena kot preklopne zapore sinhronizirane z hitro spremembo slik na zaslonu, tako da vsako oko vidi njemu namenjeno sliko. Prvi primer je zahteven za prikazovalnik in lažji za očala, ki so povsem pasivna naprava, kar omogoča lahko izvedbo, ki ni draga. Druga možnost je enostavnejša za prikazovalnik, če je le dovolj hiter, da preklaplja med prikazom ene in druge slike. V tem primeru uporabljena aktivna očala so zapletenejša za izdelavo, težja in nenazadnje dražja. Tako v primeru preklapljanja, kot v primeru izločanja pravilne polarizacije (linearne ali krožne) se uporabljajo polarizacijske snovi.



Slika 8: Prikaz delovanja pasivnih in aktivnih očal.

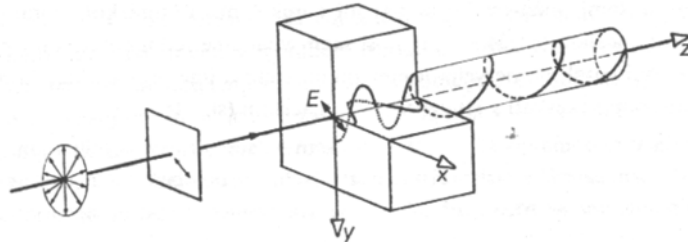
S pomočjo polarizatorja se krožno polarizirana svetloba spremeni v linearno polarizirano kot prikazuje slika 8. Tudi nepolarizirana svetloba na vhodu polarizatorja se spremeni v linearno polarizirano. V splošnem se katerakoli vhodna polarizacija spremeni v linearno.



Slika 8: Spreminjanje krožne polarizacije v linearno.

### 3.4.2. $\lambda/4$ ploščica

S ploščico iz dvolomnega kristala, ki ima mejno ploskev vzporedno z optično osjo, dobimo iz linearno polariziranega valovanja krožno polarizirano valovanje. Metoda temelji na dejstvu, da sta hitrosti različno polariziranih valovanj v dvolomnem kristalu različni. Polarizacijska ravnina linearno polarizirane vpadne svetlobe mora biti nagnjena po kotom  $45^\circ$  proti optični osi.



Slika 9: Nastanek krožno polariziranega valovanja iz linearno polariziranega valovanja v ploščici  $\lambda/4$ .

#### Primer:

Dvolomna snov ima za TE polarizacijo lomni količnik  $n_{TE}=2,05$ , za TM polarizacijo pa lomni količnik  $n_{TM}=2,20$ . Izračunajte debelino  $\lambda/4$  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.

$$\Delta\varphi = \frac{\pi}{2}$$

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

$$k_{TM} = \frac{2\pi}{\lambda_{TM}} = \frac{2\pi}{\frac{\lambda_0}{n_{TM}}}$$

$$k_{TE} = \frac{2\pi}{\lambda_{TE}} = \frac{2\pi}{\frac{\lambda_0}{n_{TE}}}$$

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

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

horizontalna polarizacija (HP) = TE

vertikalna polarizacija (VP) = TM

Po ploščici se širita obe komponenti valovanj z različnima hitrostma.

Valovanje, ki izstopa iz ploščice, je krožno polarizirano, če je ta razlika lih mnogokratnik  $\frac{1}{2}\pi$ . Debelina ploščice mora biti torej enak lihemu mnogokratniku.

Velja pa tudi obratno, če na ploščico  $\lambda/4$  vpada krožno polarizirana svetloba, dobimo na izstopu linearno polarizirano svetlobo, ki niha v smeri  $45^\circ$  glede na optično os. Glede na to, koliko ploščic uporabimo lahko dobimo levo, ali desnosučno krožno polarizirano svetlobo.



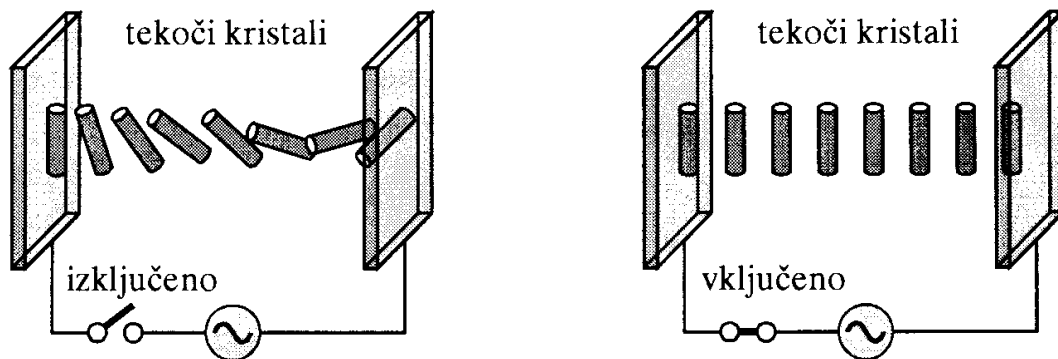
### 3.4.5. Prikazovalniki s tekočimi kristali

Tekoči kristali so organske snovi z zelo dolgimi molekulami, ki imajo v električnem polju posebne lastnosti, vendar kristalne strukture.

Tekoči kristali prepuščajo le svetlobo, ki je enako polarizirana kot so usmerjene molekule tekočih kristalov.

Če so molekule tekočih kristalov orientirane navpično, bodo prepuščale le navpično polarizirano svetlobo, ki pa jo kristali z globino zasučejo za 90° in tako dobimo na izhodu vodoravno polarizirano svetlobo.

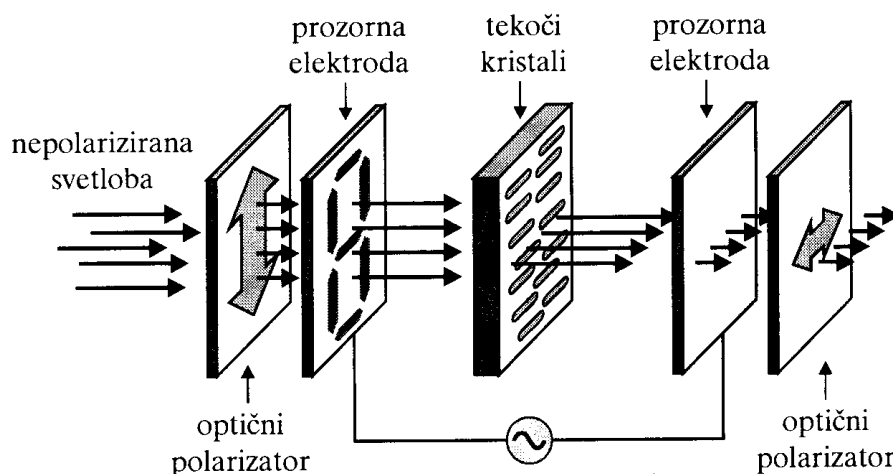
Ko pa med elektrode priključimo električno napetost, se vse molekule tekočega kristala razporedijo v eno smer in spremembe polarizacije za 90° ni in prepuščajo navpično polarizirano svetlobo.



Slika 10: Obnašanje tekočega kristala v električnem polju.

Prikazovalnik s tekočimi kristali (angl. liquid crystal display - LCD) je zgrajen iz dveh optičnih polarizatorjev, prevodnih elektrod ter vmesne celice, kjer so zaprti tekoči kristali (debeline do nekaj 10  $\mu\text{m}$ ).

Tekoče kristale postavimo med dva optična polarizatorja – s prvim prepuščamo le navpično polarizirano svetlobo, drugi pa prepušča le vodoravno polarizirano svetlobo. Če na kristalih ni napetosti, bo izhodna svetloba polarizirana vodoravno in jo bo zato vodoravni optični polarizator prepuščal. Če pa na kristale pritismo napetost (zasuka na kristalih ne bo), zato navpično polarizirana svetloba ne bo mogla skozi vodoravni optični polarizator – površina bo postala črna.



Poznamo transmisijske – vir svetlobe je postavljen za prikazovalnikom in refleksijske – svetloba se na zadnji strani odbije v ogledalu.