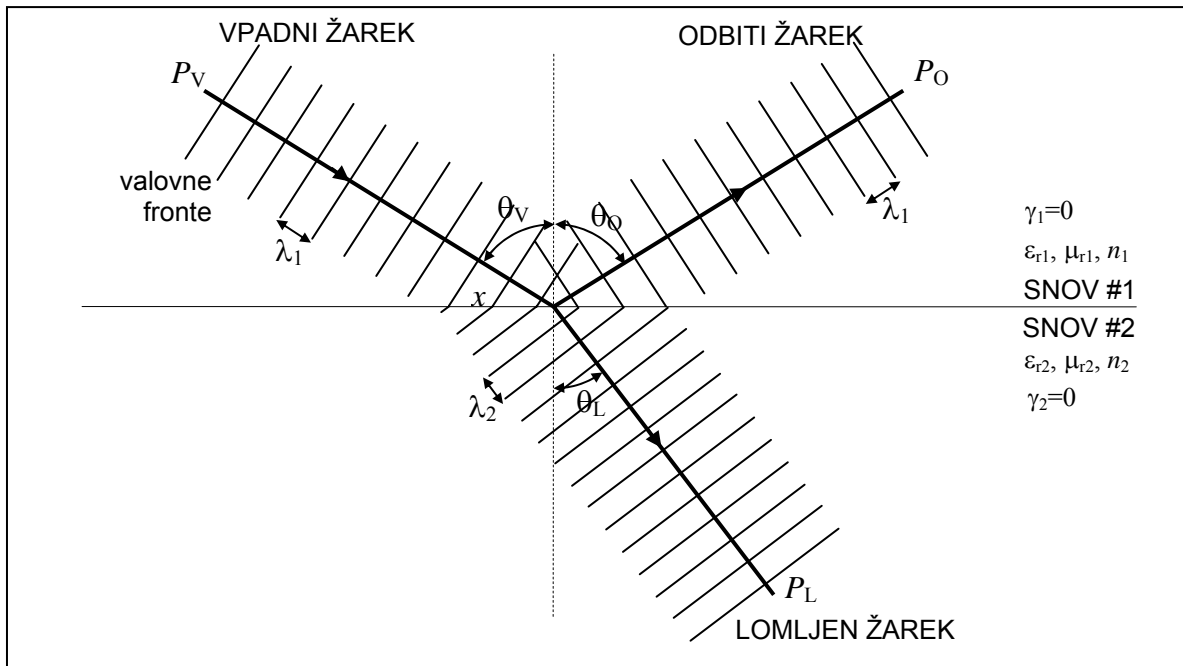


## 4. Pojavi na meji dveh dielektrikov

Elektromagnetno valovanje se lahko razširja po praznem prostoru ali snovi, vendar ena sama snov ne more voditi valovanja, zato si bomo ogledali kombinacije vsaj dveh snovi. V tem poglavju se bomo osredotočili na pojave, ki nastajajo na meji dveh dielektrikov.

### 4.1. Odbojni in lomni zakon

Poševni vpad transverzalnega elektromagnetnega (TEM) vala na mejo med dvema brezizgubnima snovema prikazuje slika 1. Vpadno valovanje ima valovne fronte, ki so pravokotne na smer širjenja valovanja in razmaknjene za  $\lambda_1$ .



Slika 1: Vpad žarka na mejo dveh snovi.

Dolžine projekcije  $x$  so v vsaki točki na meji dveh snovi enake, saj mora biti prehod na meji zvezen. Dolžine projekcij za vse tri žarke znašajo

$$x = \frac{\lambda_1}{\sin \theta_V} = \frac{\lambda_1}{\sin \theta_O} = \frac{\lambda_2}{\sin \theta_L}. \quad (1)$$

Ker valovanje v primeru vpadnega in odbitega žarka potuje po snovi 1, sta valovna dolžina vpadnega in odbitega žarka enaki. Torej sta vpadni in odbiti kot enaka. To dejstvo imenujemo **odbojni zakon**.

$$\theta_V = \theta_O. \quad (2)$$

Poiščimo še zakonitost med vpadnim in lomljenim kotom.

$$\frac{\lambda_1}{\sin \theta_V} = \frac{\lambda_2}{\sin \theta_L}. \quad (3)$$

V tem zapisu lahko valovni dolžini izrazimo z valovno dolžino v praznem prostoru, pri čemer je potrebno upoštevati skaliranje z lomnim količnikom posamezne snovi.

$$\frac{\lambda_0}{n_1 \sin \theta_V} = \frac{\lambda_0}{n_2 \sin \theta_L} \quad (4)$$

Valovne dolžine lahko krajšamo in dobimo izraz

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{\sin \theta_L}{\sin \theta_V}, \quad (5)$$

kar imenujemo **Shnellov lomni zakon**.

Razmerje lomnih količnikov lahko zapišemo tudi z razmerjem hitrosti v snoveh.

$$\frac{c_2}{c_1} = \frac{\sin \theta_L}{\sin \theta_V} \quad (6)$$

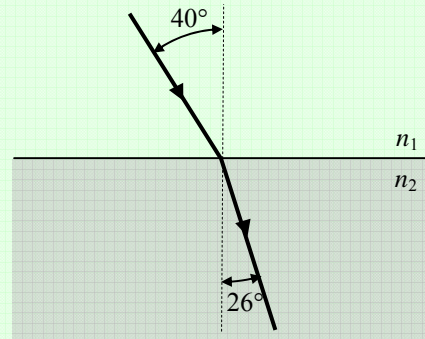
**Primer:**

Žarek z valovno dolžino  $\lambda_1=500$  nm potuje po zraku ( $n_1=1$ ) in vpade na transparentno snov. Vpadni žarek oklepa proti normalni kot  $\theta_1=40^\circ$ . Lomljeni žarek oklepa proti normalni kot  $\theta_2=26^\circ$ . Poišči lomni količnik snovi  $n_2$ ! Kolikšna je valovna dolžina svetlobe v snovi  $\lambda_2$ ?

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

$$n_2 = \frac{n_1 \sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{0,643}{0,438} = \underline{\underline{1,47}}$$

$$\lambda_2 = \frac{\lambda_1}{n_2} = \frac{500 \text{ nm}}{1,47} = \underline{\underline{340 \text{ nm}}}$$



**Primer:**

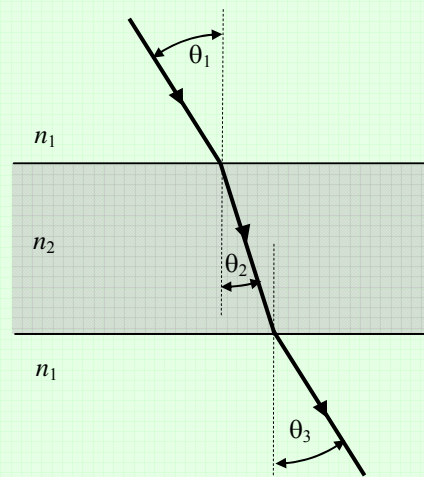
Žarek vpade iz zraka ( $n_1$ ) na transparentno snov pod kotom  $\theta_1$ . Po preletu snovi z lomnim količnikom  $n_2$  vstopi ponovno v zrak. Koliko znaša izstopni kot iz snovi  $\theta_3$ ?

$$\sin \theta_2 = \frac{n_1}{n_2} \sin \theta_1$$

$$\sin \theta_3 = \frac{n_2}{n_1} \sin \theta_2$$

$$\sin \theta_3 = \frac{n_2}{n_1} \cdot \left( \frac{n_1}{n_2} \sin \theta_1 \right) = \sin \theta_1$$

$$\underline{\underline{\theta_3 = \theta_1}}$$

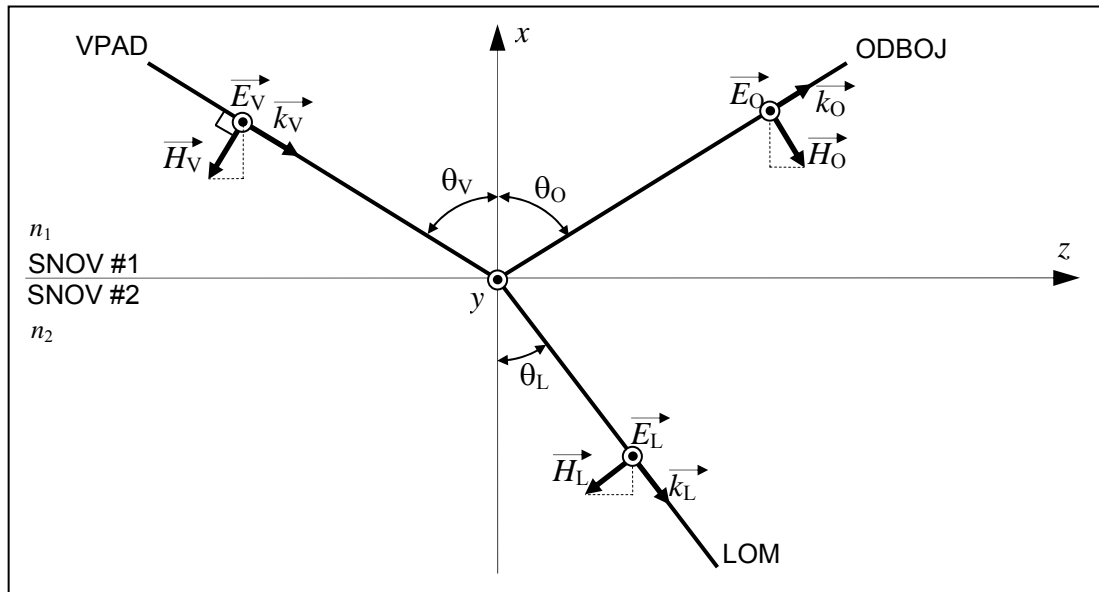


## 4.2. Delitev moči med odbitim in lomljenim žarkom

Sedaj, ko poznamo odbojni in lomni zakon elektromagnetnega valovanja, nas bo zanimalo, kako se deli moč vpadnega žarka na moč odbitega žarka in moč lomljenega žarka. Elektromagnetno valovanje je prečno valovanje in delitev moči zavisi od smeri vektorjev električne poljske jakosti in magnetne poljske jakosti. Tako ločimo transverzalno električni (TE) primer, ko je električno polje vzporedno meji snovi, in transverzalno magnetni (TM) primer, ko je magnetno polje vzporedno meji snovi.

### 4.2.1. TE primer vpada elektromagnetnega valovanja na mejo dveh snovi

Poševni vpad TE vala na mejo med dvema snovema prikazuje slika 2. Obravnavajmo odboj ravninskega elektromagnetnega vala na meji dveh dielektrikov brez izgub. Predpostavimo, da je lomni količnik druge snovi večji od lomnega količnika prve snovi  $n_2 > n_1$ .



Slika 2: Vpad TE valovanja na mejo dveh snovi.

Električna poljska jakost naj bo vzporedna z mejno ravnino med snovema. Izberemo jo tako, da je vzporedna z osjo  $y$ , pri čemer vpadni, odbiti in lomljeni val električne poljske jakosti zapišemo kot

$$\vec{E}_V = \vec{1}_y E_V; \quad \vec{E}_O = \vec{1}_y E_O; \quad \vec{E}_L = \vec{1}_y E_L. \quad (7)$$

Magnetna poljska jakost leži v vpadni ravnini in vpadni, odbiti ter lomljeni val magnetne poljske jakosti zapišemo kot

$$\vec{H}_V = \vec{1}_x H_{Vx} + \vec{1}_z H_{Vz}; \quad \vec{H}_O = \vec{1}_x H_{Ox} + \vec{1}_z H_{Oz}; \quad \vec{H}_L = \vec{1}_x H_{Lx} + \vec{1}_z H_{Lz} \quad (8)$$

$$H_{Vx} = -H_V \sin\theta_V = -\frac{E_V}{Z_1} \sin\theta_V \quad (9)$$

$$H_{Vz} = -H_V \cos\theta_V = -\frac{E_V}{Z_1} \cos\theta_V \quad (10)$$

$$H_{Ox} = -\frac{E_O}{Z_1} \sin\theta_O; \quad H_{Oz} = \frac{E_O}{Z_1} \cos\theta_O \quad (11)$$

$$H_{Lx} = -\frac{E_L}{Z_2} \sin\theta_L; \quad H_{Lz} = -\frac{E_L}{Z_2} \cos\theta_L \quad (12)$$

Na mejni ravnini morajo polja izpolnjevati mejne pogoje, ki narekujejo zvezen prehod tangencialnih komponent električnega in magnetnega polja. Enakost tangencialnih komponent terja hkrati enakost amplitude in enakost faze polja. Enakost faze je zagotovljena le, če je komponenta hitrosti v smeri osi  $z$  vseh treh valov enaka. To hkrati pomeni, da so ustrezne komponente fazne konstante enake, torej

$$k_{1Vz} = k_{1Oz} = k_{2Lz} \quad (13)$$

Prestopni pogoj za električno poljsko jakost izenačuje vsa polja v prvi snovi in vsa polja v drugi snovi.

$$E_V + E_O = E_L \quad (14)$$

Prestopni pogoj za magnetno poljsko jakost izenačuje tangencialne komponente

$$H_{Vz} + H_{Oz} = H_{Lz}, \quad (15)$$

kar lahko zapišemo

$$-\frac{E_V}{Z_1} \cos\theta_V + \frac{E_O}{Z_1} \cos\theta_O = -\frac{E_L}{Z_2} \cos\theta_L \quad (16)$$

Po odbojnem zakonu velja  $\theta_V = \theta_O$ .

$$(E_V - E_O) \frac{\cos\theta_V}{Z_1} = E_L \frac{\cos\theta_L}{Z_2} \quad (17)$$

Definirajmo odbojnost TE polja kot razmerje med amplitudo električnega polja odbitega vala in amplitudo električnega polja vpadnega vala pri  $x=0$ .

$$\Gamma_{TE} = \frac{E_O}{E_V} \quad (18)$$

Iz sistema enačb, ki ga tvorita zapisa (14) in (17), dobimo

$$(E_V - E_O) \frac{\cos\theta_V}{Z_1} = (E_V + E_O) \frac{\cos\theta_L}{Z_2}, \quad (19)$$

$$E_V \left( \frac{\cos\theta_V}{Z_1} - \frac{\cos\theta_L}{Z_2} \right) = E_O \left( \frac{\cos\theta_V}{Z_1} + \frac{\cos\theta_L}{Z_2} \right), \quad (20)$$

kar nam da za odbojnost

$$\Gamma_{TE} = \frac{E_O}{E_V} = \frac{\frac{\cos\theta_V}{Z_1} - \frac{\cos\theta_L}{Z_2}}{\frac{\cos\theta_V}{Z_1} + \frac{\cos\theta_L}{Z_2}}. \quad (21)$$

V dielektriku velja  $Z_1 = \frac{Z_0}{n_1}$  in  $Z_2 = \frac{Z_0}{n_2}$ , kar nam spremeni zapis za odbojnost v

$$\Gamma_{TE} = \frac{n_1 \cos\theta_V - n_2 \cos\theta_L}{n_1 \cos\theta_V + n_2 \cos\theta_L}. \quad (22)$$

Kosinus lomljenega kota lahko s pomočjo lomnega zakona izrazimo z vpadnim kotom.

$$\cos\theta_L = \sqrt{1 - \sin^2\theta_L} = \sqrt{1 - \left( \frac{n_1}{n_2} \sin\theta_V \right)^2} \quad (23)$$

Odbojnost TE polja je potemtakem

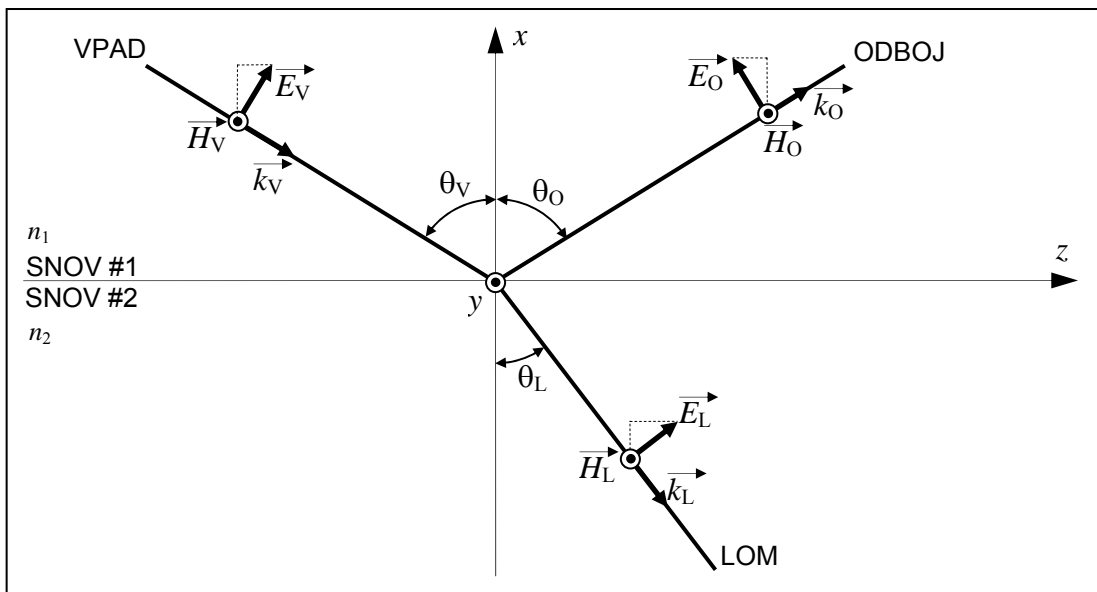
$$\Gamma_{TE} = \frac{n_1 \cos \theta_V - n_2 \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \sin^2 \theta_V}}{n_1 \cos \theta_V + n_2 \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \sin^2 \theta_V}} . \quad (24)$$

Če celotno enačbo delimo z  $n_1$ , dobimo zapis, ki definira jakost odbitega električnega polja. Imenujemo ga Fresnelov izraz za odbojnost TE valovanja.

$$\Gamma_{TE} = \frac{\cos \theta_V - \sqrt{\left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 - \sin^2 \theta_V}}{\cos \theta_V + \sqrt{\left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 - \sin^2 \theta_V}} . \quad (25)$$

#### 4.2.2. TM primer vpada elektromagnetnega valovanja na mejo dveh snovi

Poševni vpad TM vala na mejo med dvema snovema prikazuje slika 3. Obravnavajmo odboj ravninskega elektromagnetnega vala na meji dveh dielektrikov brez izgub. Predpostavimo, da je lomni količnik druge snovi večji od lomnega količnika prve snovi  $n_2 > n_1$ .



Slika 3: Vpad TM valovanja na mejo dveh snovi.

Magnetna poljska jakost naj bo vzporedna z mejno ravnino med snovema. Izberemo jo tako, da je vzporedna z osjo  $y$ , pri čemer vpadni, odbiti in lomljeni val električne poljske jakosti zapišemo kot

$$\vec{H}_V = \vec{1}_y H_V; \quad \vec{H}_O = \vec{1}_y H_O; \quad \vec{H}_L = \vec{1}_y H_L . \quad (26)$$

Električna poljska jakost leži v vpadni ravnini in vpadni, odbiti in lomljeni val električne poljske jakosti zapišemo kot

$$\vec{E}_V = \vec{1}_x E_{Vx} + \vec{1}_z E_{Vz}; \quad \vec{E}_O = \vec{1}_x E_{Ox} + \vec{1}_z E_{Oz}; \quad \vec{E}_L = \vec{1}_x E_{Lx} + \vec{1}_z E_{Lz} \quad (27)$$

$$E_{Vx} = E_V \sin \theta_V; \quad E_{Vz} = E_V \cos \theta_V \quad (28)$$

$$E_{Ox} = E_O \sin \theta_O ; \quad E_{Oz} = -E_O \cos \theta_O \quad (29)$$

$$E_{Lx} = E_L \sin \theta_L ; \quad E_{Lz} = E_L \cos \theta_L \quad (30)$$

Tudi tu velja, da morajo na mejni ravnini polja izpolnjevati mejne pogoje, ki narekujejo zvezen prehod tangencialnih komponent električnega in magnetnega polja. Enakost tangencialnih komponent terja hkrati enakost amplitude in enakost faze polja. Prestopni pogoj za magnetno poljsko jakost izenačuje vsa polja v prvi snovi in vsa polja v drugi snovi.

$$H_V + H_O = H_L \quad (31)$$

Ker je odbojnost definirana z električnimi poljskimi jakosti je potrebno prestopne pogoje za magnetno poljsko jakost zapisati

$$\frac{E_V}{Z_1} + \frac{E_O}{Z_1} = \frac{E_L}{Z_2} \quad (32)$$

Prestopni pogoj za tangencialno komponento električne poljske jakosti zapišemo

$$E_{Vz} + E_{Oz} = E_{Lz} , \quad (33)$$

$$E_V \cos \theta_V - E_O \cos \theta_O = E_L \cos \theta_L . \quad (34)$$

Po odbojnem zakonu velja  $\theta_V = \theta_O$ .

$$(E_V - E_O) \cos \theta_V = E_L \cos \theta_L \quad (35)$$

Tudi odbojnost TM polja je definirana kot razmerje med amplitudo električnega polja odbitega vala in amplitudo električnega polja vpadnega vala pri  $x=0$ .

$$\Gamma_{TM} = \frac{E_O}{E_V} \quad (36)$$

Iz sistema enačb, ki ga tvorita zapisa (33) in (37) dobimo

$$(E_V - E_O) \cos \theta_V = \frac{Z_2}{Z_1} (E_V + E_O) \cos \theta_L , \quad (37)$$

kar nam da za odbojnost

$$\Gamma_{TM} = \frac{E_O}{E_V} = \frac{Z_1 \cos \theta_V - Z_2 \cos \theta_L}{Z_1 \cos \theta_V + Z_2 \cos \theta_L} . \quad (38)$$

V dielektriku velja  $Z_1 = \frac{Z_0}{n_1}$  in  $Z_2 = \frac{Z_0}{n_2}$ , kar nam spremeni zapis za odbojnost v

$$\Gamma_{TM} = \frac{\frac{\cos \theta_V}{n_1} - \frac{\cos \theta_L}{n_2}}{\frac{\cos \theta_V}{n_1} + \frac{\cos \theta_L}{n_2}} . \quad (39)$$

Ko celotno enačbo množimo z  $n_2$  in kosinus lomljenega kota nadomestimo s pomočjo lomnega zakona oziroma z izrazom (23), dobimo

$$\Gamma_{TM} = \frac{\frac{n_2}{n_1} \cos \theta_v - \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \sin \theta_v\right)^2}}{\frac{n_2}{n_1} \cos \theta_v + \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \sin \theta_v\right)^2}}. \quad (40)$$

Če sedaj enačbo množimo s razmerjem med  $n_2$  in  $n_1$ , dobimo odbojnost TM polja. Ta zapis imenujemo Fresnelov izraz za odbojnost TM valovanja.

$$\Gamma_{TM} = \frac{\left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 \cos \theta_v - \sqrt{\left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 - \sin^2 \theta_v}}{\left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 \cos \theta_v + \sqrt{\left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 - \sin^2 \theta_v}}. \quad (41)$$

#### 4.2.3. Razmerje moči med vpadnim, odbitim in lomljenim žarkom

Sedaj smo prišli do izrazov za odbojnost pri TE in TM primeru vpadnega valovanja na mejo dveh snovi. V primeru, da vpadnega transverzalnega elektromagnetnega (TEM) valovanja moramo polje razčleniti in za vsako komponento posebej izračunati vrednosti odbitega polja, glede na podane odbojnosti. Če je vpadna svetloba nepolarizirana potem se enakomerno deli na TE in TM komponento.

$$\vec{E}_v = \vec{E}_{v,TE} + \vec{E}_{v,TM} \quad (42)$$

$$E_{o,TE} = E_{v,TE} \cdot \Gamma_{TE} \quad (43)$$

$$E_{o,TM} = E_{v,TM} \cdot \Gamma_{TM} \quad (44)$$

Jakost lomljenega električnega polja za en in drug primer računamo kot

$$E_{L,TE} = E_{v,TE} + E_{o,TE} = E_{v,TE} + E_{v,TE} \Gamma_{TE} = E_{v,TE} (1 + \Gamma_{TE}). \quad (45)$$

$$E_{L,TM} = E_{v,TM} + E_{o,TM} = E_{v,TM} + E_{v,TM} \Gamma_{TM} = E_{v,TM} (1 + \Gamma_{TM}). \quad (46)$$

Jakost polja je podana kot

$$S = \frac{|E|^2}{2Z} \quad (47)$$

Kar pomeni, da sta jakost odbitega in vpadnega žarka povezana s kvadratom odbojnosti

$$S_o = S_v |\Gamma|^2 \quad (48)$$

Moč vpadnega žarka je enaka produktu jakosti vpadnega polja in površine na katero vpada.

$$P = A \cdot S \quad (49)$$

Torej je moč odbitega žarka tudi enaka produktu moči vpadnega žarka s kvadratom odbojnosti

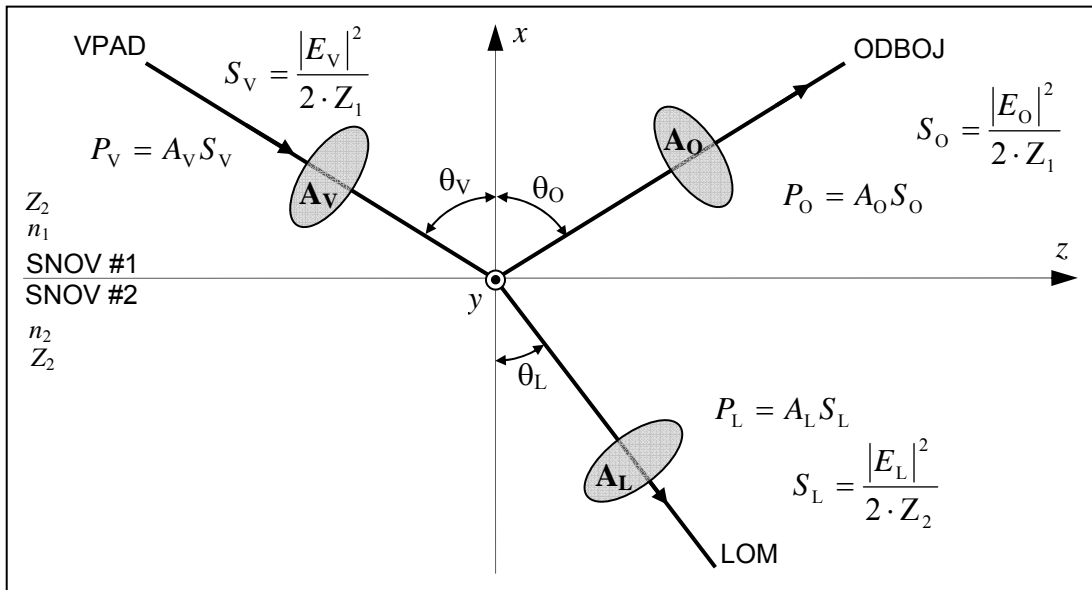
$$P_o = P_v |\Gamma|^2 \quad (50)$$

Vpadna in odbita površina žarka sta enaki, medtem ko je površina lomljenega žarka odvisna od lomnega kota in različna od površin v zgornjem prostoru.

$$A_v = A_o \neq A_L \quad (51)$$

Moč lomljenega žarka se zato izračuna kot razlika

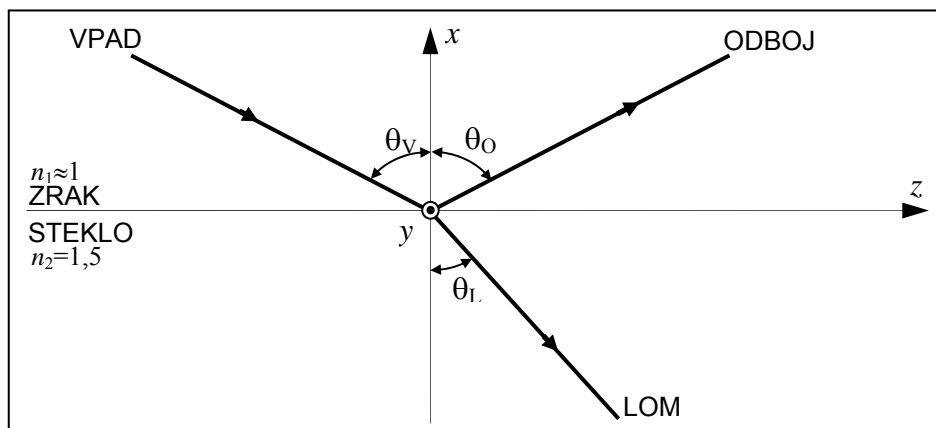
$$P_L = P_V - P_O = P_V(1 - |\Gamma|^2) \quad (52)$$



Slika 4: Razmerje moči.

#### 4.2.4. Vpad transverzalnega elektromagnetnega valovanja iz zraka na steklo

Oglejmo si sedaj primer, ko transverzalno elektromagnetno (TEM) valovanje vpade iz zraka z lomnim količnikom 1 v steklo z lomnim količnikom 1,5.



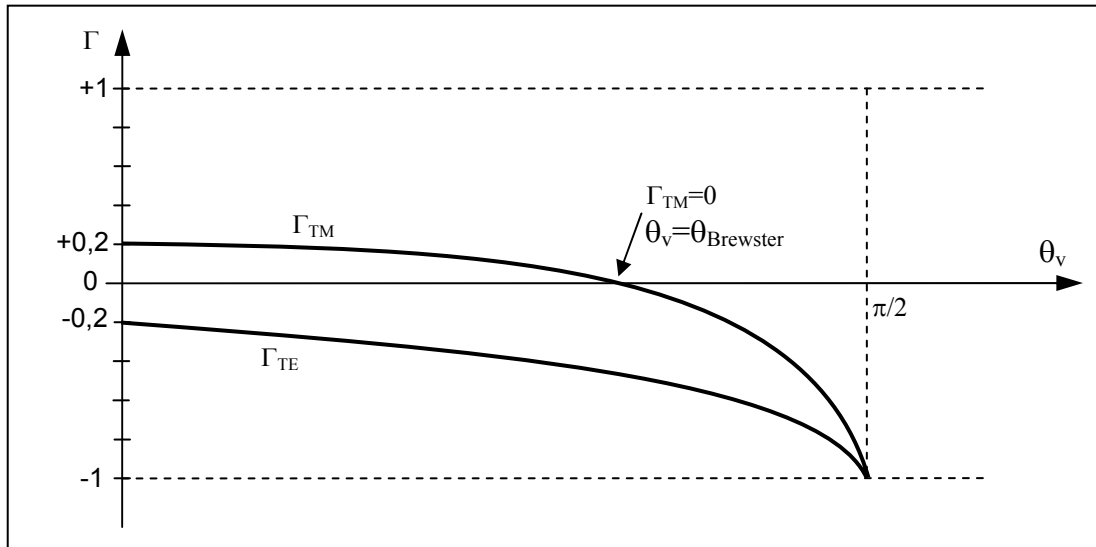
Slika 5: Vpad TEM valovanja na mejo zrak – steklo.

V primeru, da valovanje vpada na mejo pravokotno oziroma poševni dobimo za odbojnosti vrednosti, ki jih prikazuje tabela 1. Pri poševnem vpadu  $\theta_V = \pi/2$  je odboj 100%. Celoten potek vmesnih kotov je prikazan na sliki 5.

$\theta_V$	$\Gamma_{TE}$	$\Gamma_{TM}$
0	-0,2	+0,2
$\pi/2$	-1	-1

Tabela 1: Vrednosti TE in TM odbojnosti za skrajne primere vpadnega kota.





Slika 6: Graf odbojnosti TE in TM valovanja pri vpadu na mejo zrak – steklo.

**Primer:**

Sončna svetloba s pretokom moči  $S$  vpada pravokotno iz zraka ( $n_1=1$ ) na steklo z lomnim količnikom  $n=1,5$ . Koliko procentov moči svetlobe se odbije nazaj v zrak? Koliko procentov moči svetlobe preide naprej?

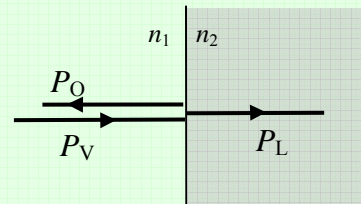
$$P = S \cdot A$$

Pretok moči  $S$  je velikost Poyntingovega vektorja, ki izraža površinsko gostoto vpadnega svetlobnega toka  $\text{W/m}^2$ , kjer je  $P$  moč, ki jo pravokotno prestreza ploskvica površine  $A$ .

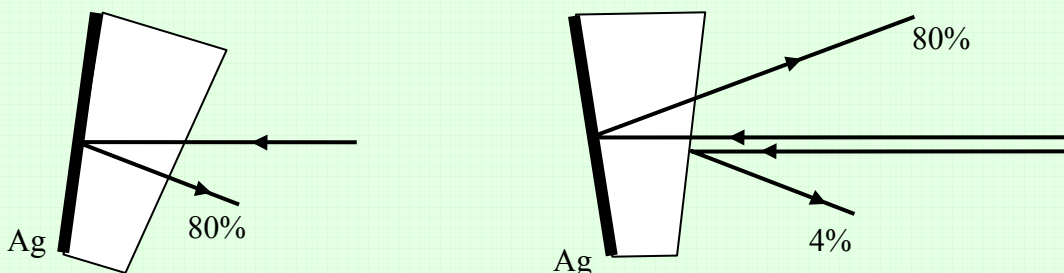
$$S = \frac{|E|^2}{2Z}$$

$$P_O = P_V \cdot |\Gamma|^2 = 4\% \cdot P_V$$

$$P_L = P_V \cdot (1 - |\Gamma|^2) = 96\% \cdot P_V$$


**Primer:**

Ta pojav izkorišča vzvratno ogledalo pri avtomobilih. Podnevi je ogledalo na normalni poziciji in imamo 80% odboja od kovinskega srebrnega (Ag) zrcala. Ponoči ogledalo obrnemo v strop avtomobila in izkoriščamo 4% odboj, da nas luči avtomobilov, ki vozijo za nami ne slepijo.



Iz grafa na sliki 5 vidimo, da se pri nekem vpadnem kotu TM valovanje čisto nič ne odbije, ampak se samo lomi. Ta kot imenujemo Brewsterjev kot  $\theta_B$  po škotskem fiziku. Poskušajmo ga določiti.

$$\Gamma_{TM} = 0 = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 \cos\theta_B - \sqrt{\left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 - \sin^2\theta_B} \quad (53)$$

$$\left(\frac{n_2}{n_1}\right)^4 \cos^2\theta_B = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 - \sin^2\theta_B \quad (54)$$

$$\left(\frac{n_2}{n_1}\right)^4 \cos^2\theta_B = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 - (1 - \cos^2\theta_B) \quad (55)$$

$$\cos^2\theta_B = \frac{\left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 - 1}{\left(\frac{n_2}{n_1}\right)^4 - 1} = \frac{\left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 - 1}{\left(\left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 + 1\right) \cdot \left(\left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 - 1\right)} = \frac{1}{\left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 + 1} \quad (56)$$

$$\theta_B = \arccos \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 + 1}} \quad (57)$$

Lahko pa poskusimo tudi drugače.

$$\frac{1}{\cos^2\theta_B} = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 + 1 \quad (58)$$

$$\frac{1}{\cos^2\theta_B} - 1 = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 = \frac{1 - \cos^2\theta_B}{\cos^2\theta_B} = \frac{\sin^2\theta_B}{\cos^2\theta_B} = \operatorname{tg}^2\theta_B \quad (59)$$

$$\theta_B = \operatorname{arctg}\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad (60)$$

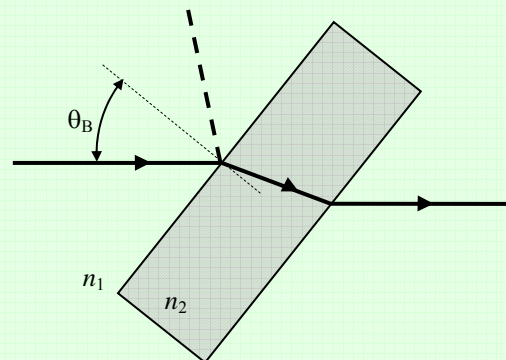
#### Primer:

Žarek s TM polarizacijo vpade iz zraka ( $n_1=1$ ) na transparentno snov ( $n_2=1,5$ ). Pri katerem vpadnem kotu ne dobimo odbitega žarka?

Odboja ni pri Brewsterjevem kotu  $\theta_B$ , ki znaša

$$\theta_B = \operatorname{arctg}\left(\frac{n_2}{n_1}\right) = \operatorname{arctg}\left(\frac{1,5}{1}\right)$$

$$\theta_B = 56,3^\circ$$



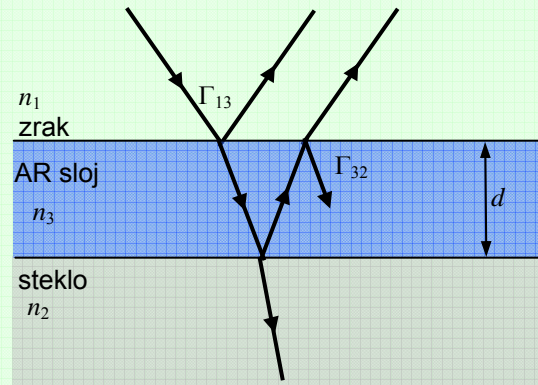
**Primer:**

V primerih, da je odboj nezaželen tudi pri ostalih polarizacijah in kotih ne samo pri Brewsterjevem kotu, je rešitev antirefleksni sloj.

$$\Gamma_{13} = \Gamma_{32}$$

$$n_3 = \sqrt{n_1 n_2}$$

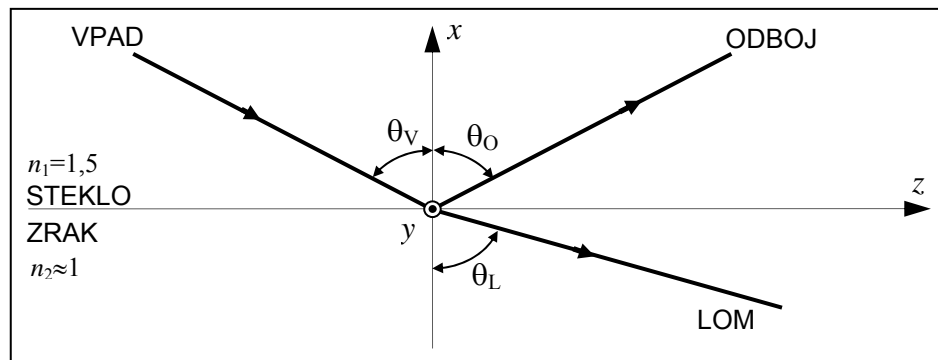
$$d = \lambda_3/4 = 100 \text{ nm za vidno svetlobo}$$



Laser za branje zgoščenk ima leče modre barve, ker je dvokratna frekvenca od infrardeče svetlobe ravno modra svetloba. AR sloj za infrardečo svetlobo je potreben, da se svetloba ne odbije od zgoščene večkrat. V tem primeru je AR sloj izdelan iz  $\text{MgF}_2$  (magnezijev difluorid).

#### 4.2.5. Vpad elektromagnetnega valovanja iz stekla v zrak

Oglejmo si sedaj primer, ko transversalno elektromagnetno (TEM) valovanje vpade iz stekla z lomnim količnikom 1,5 v zrak z lomnim količnikom 1.



Slika 7: Vpad TEM valovanja na mejo steklo – zrak.

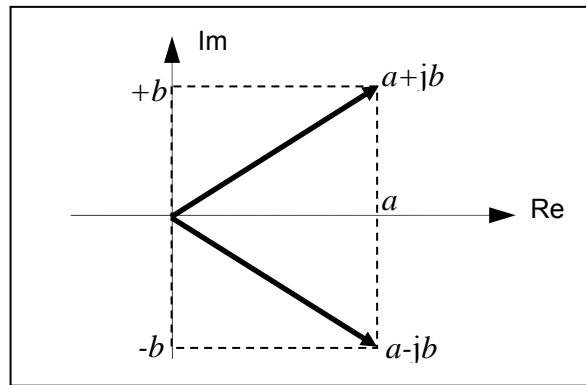
V primeru, da valovanje vpada na mejo pravokotno oziroma poševni dobimo za odbojnosti vrednosti, ki jih prikazuje tabela 2. Pri poševnem vpadu  $\theta_v = \pi/2$  je odboj 100%. Celoten potek vmesnih kotov je prikazan na sliki 8. Pri kotih nad  $\theta_k$  postane vrednost pod korenem negativna, kar pomeni, da dobimo kompleksno odbojnost v obliki

$$\Gamma = \frac{a - jb}{a + jb}, \quad (61)$$

pri čemer sta  $a$  in  $b$ , ki ju prikazuje slika 7, izražena kot

$$a = \begin{cases} \cos \theta_v & ; TE \\ \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 \cos \theta_v & ; TM \end{cases} \quad (62)$$

$$b = \sqrt{\sin^2 \theta_v - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2} \quad (63)$$



Slika 8: Prikaz kompleksnega števila v kompleksni ravnini.

Absolutna vrednost imaginarne odbojnosti po zapisu (51) je

$$|\Gamma| = 1. \quad (64)$$

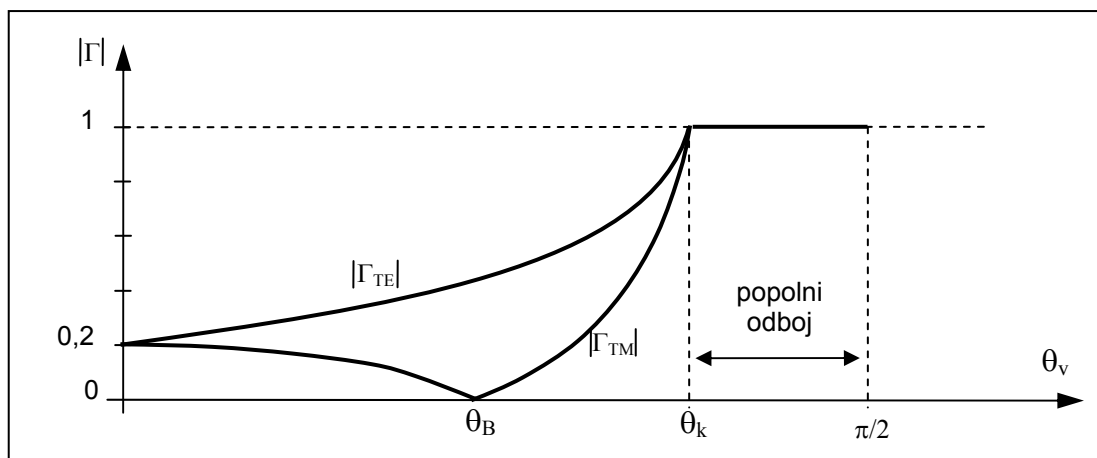
Kritični kot  $\theta_k$  izračunamo iz pogoja, ko bo imaginarni del enak nič  $b=0$ .

$$b = \sqrt{\sin^2 \theta_k - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2} = 0 \quad \Rightarrow \quad \theta_k = \arcsin \frac{n_2}{n_1} \quad (65)$$

Pri  $\theta_k$  je lomljeni žarek vzporeden meji dveh dielektrikov.

$\theta_v$	$\Gamma_{TE}$	$\Gamma_{TM}$
0	+0,2	-0,2
$\pi/2$	-1	-1
$\theta_k$	+1	+1

Tabela 2: Vrednosti TE in TM odbojnosti za skrajne primere vpadnega kota.



Slika 9: Graf odbojnosti TE in TM valovanja pri vpadu na mejo steklo – zrak.

V področju popolnega odboja znašata moč odbitega in lomljenega žarka

$$P_O = P_V |\Gamma|^2 = \underline{\underline{P_V}}, \quad (66)$$

$$P_L = P_V (1 - |\Gamma|^2) = \underline{\underline{0}} \quad (67)$$

Popolni odboj nam omogoča upravljanje valovanja v smislu spremembe smeri valovanja s pomočjo dielektrikov. Tovrstno upravljanje je brezizgubno, ker je popolni odboj povsem brezizguben.

**Primer:**

Neusmerjeno svetilo sveti iz dna bazena globine 5 m in osvetljuje površino 14,5 m<sup>2</sup>. Določite relativno dielektrično tekočine v bazenu ( $\epsilon_r = ?$ ).

