

Tuneliranje elektromagnetnega valovanja

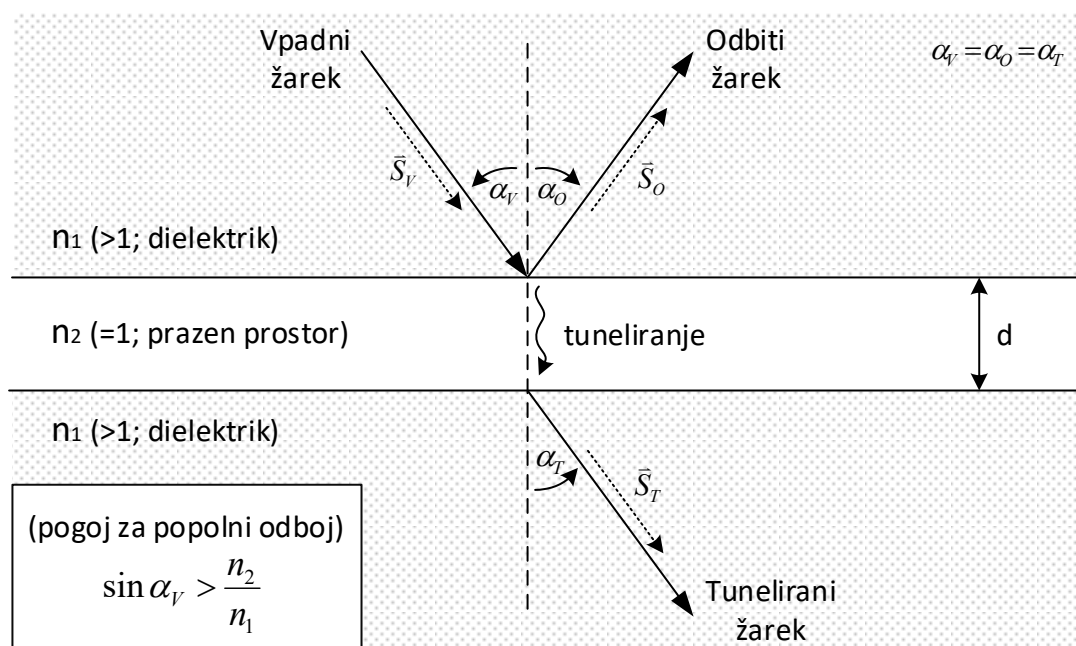
Popolni odboj in tuneliranje

Na meji dveh snovi, v katerih se valovanje širi z različnimi hitrostmi, običajno opazimo dva pojava: lom valovanja v drugo snov in odboj valovanja nazaj v isto snov. Smeri lomljenega in odbitega valovanja določa Snell-ov lomni zakon. Lomni zakon enostavno razložimo tako, da mora biti fazni zamik med vpadnim, odbitim in lomljenim valovanjem enak kjerkoli na meji dveh snovi.

Ko je valovna dolžina vpadnega valovanja zadosti majhna (velik lomni količnik prve snovi) in je vpadni kot (glede na pravokotnico mejne ploskve) zadosti velik, se lahko zgodi, da v drugi snovi z nižjim lomnim količnikom ne more obstajati potujoče valovanje v nobeni smeri, ki bi izpolnjevalo zahtevo po enakem faznem zamiku v katerikoli točki mejne ploskve.

Ko lomljeno valovanje ne more obstajati, se celotna moč vpadnega valovanja pretvori v odbito valovanje. Pojav zato imenujemo popolni odboj. Popolni odboj praktično izkoriščamo v številnih napravah, na primer v električnih in svetlobnih valovodih brez kovinskih sten, kar omogoča zelo majhno slabljenje. Enostavna zahteva po enakem faznem zamiku kjerkoli na mejni ploskvi seveda ne more razložiti, kaj se pri popolnem odboju točno dogaja v drugi snovi, kjer ne moremo poiskati lomljenega valovanja. Točnejša obravnava popolnega odboja pokaže, da sega valovanja tudi v drugo snov z nižjim lomnim količnikom. Jakost valovanja v drugi snovi eksponentno upada z oddaljenostjo od meje snovi. Valovne fronte so pravokotne na mejo snovi in se pomikajo v smeri meje snovi. Valovanje v drugi snovi prenaša le jalovo (reaktivno) moč.

Pri praktični uporabi popolnega odboja moramo upoštevati, da pri pojavu sodeluje tudi snov z nižjim lomnim količnikom, kjer ne dobimo potujočega valovanja. Določiti je treba, koliko mora biti debela plast snovi z nižjim lomnim količnikom, da pojav popolnega odboja ne bo moten. Če plasti snovi z nižjim lomnim količnikom sledi spet snov z dovolj visokim lomnim količnikom, pride do tuneliranja dela moči valovanja, kar odžira moč odbitemu valovanju.



Slika 1: Tuneliranje elektromagnetnega valovanja

Najenostavnejši primer tuneliranja (elektromagnetnega ali drugačnega) valovanja je prikazan na Sliki 1. Vpadno valovanje se širi po gornjem polprostoru z visokim lomnim količnikom n_1 in se večinoma odbije na meji plasti (debeline d) z nižjim lomnim količnikom n_2 . Del valovanja tunelira skozi plast n_2 v spodnji polprostor, ki ima spet visok lomni količnik n_1 .

Ista zahteva, kot za Snell-ov lomni zakon, takoj pove, da se tunelirano valovanje širi v isti smeri kot vpadno valovanje. V plasti z nižjim lomnim količnikom n_2 dobimo dve rešitvi za eksponentno upadajoče oziroma naraščajoče polje. Skupno polje obeh rešitev prenaša delovno moč tuneliranemu valovanju v spodnjem polprostoru z visokim lomnim količnikom n_1 . Ker je elektromagnetno valovanje prečno (transverzalno) valovanje, dobimo seveda dve različni razmerji glede na smer elektromagnetnega polja: TE (električno polje vzporedno z mejno ploskvijo) in TM (magnetno polje vzporedno z mejno ploskvijo).

Kljub izpolnjeni zahtevi za popolni odboj je v slučaju tuneliranja moč odbitega žarka oslABLJENA glede na moč vpadnega žarka. Razlika moči gre v tunelirani žarek. Tuneliranje valovanja je zato pomemben izgubni mehanizem v dielektričnih valovodih. Pri ukrivljeni mejni ploskvi snovi lahko pride do tuneliranja že v sami snovi z nižjim lomnim količnikom n_2 , kar pomeni izgube na vseh krivinah dielektričnega valovoda.

Moč tuneliranega valovanja zelo hitro upada z naraščanjem debeline d plasti z nižjim lomnim količnikom n_2 . Razmerje gostot moči tuneliranega in vpadnega valovanja je podano z izrazom 1.1.

$$\frac{S_T}{S_V} = \frac{1}{1 + \frac{(1+u)^2}{4u} \sin^2 \alpha} \quad (1.1)$$

$$\text{kjer je } v = k_2 d \sqrt{\left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \sin^2 \alpha - 1}, \quad u_{TE} = \frac{\sin^2 \alpha - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2}{\cos^2 \alpha} \text{ ali } u_{TM} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^4 u_{TE} \quad (1.2) \quad (1.3) \quad (1.4)$$

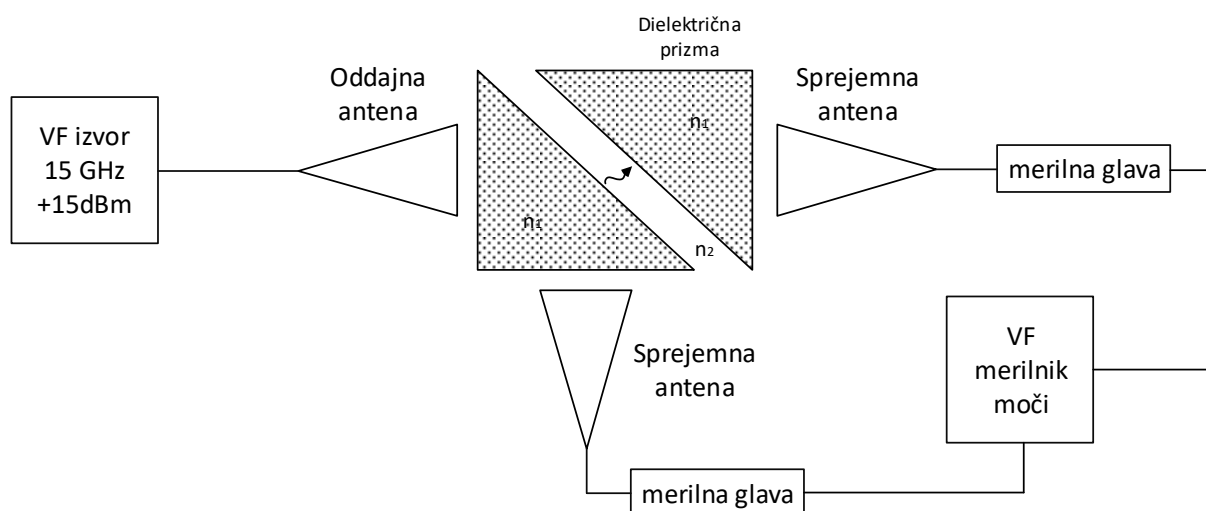
Faktor u je različen za TE/TM valovanje (1.3) (1.4).

Seznam potrebnih pripomočkov

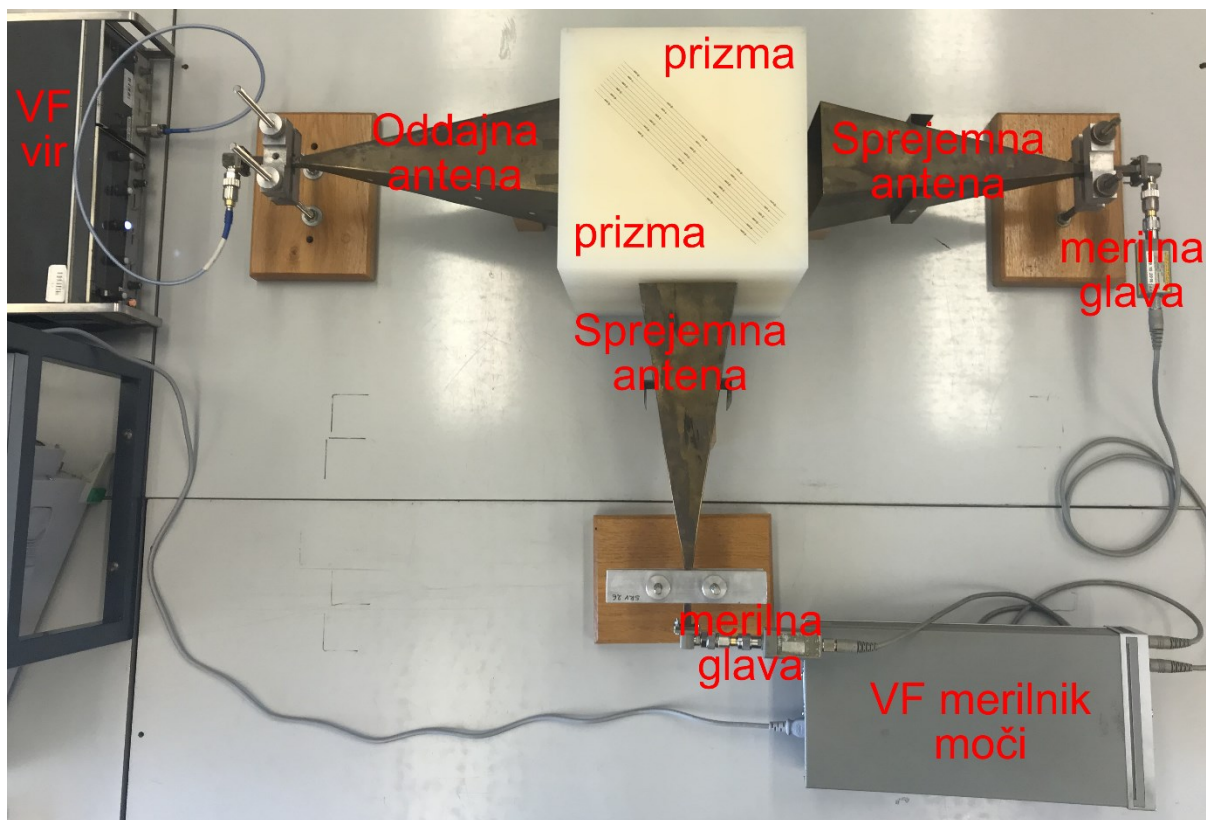
Za izvedbo vaje potrebujemo:

- Nemoduliran mikrovalovni izvor za 15 GHz moči 30 mW (+15 dBm)
- Tri antene (valovodna lijaka) za 15 GHz, na podstavkih
- Dve veliki dielektrični prizmi iz polipropilena z $\epsilon_r = 2.2 - 2.36$
- VF (mikrovalovni) merilnik moči s toplotnima glavama
- Ravnilo za merjenje razdalje med prizmama in antenama

Postavitev merilnih pripomočkov prikazuje Slika 2, razporeditev pa Slika 3.



Slika 2: Skica vezave merilnih pripomočkov



Slika 3: Slika vezave merilnih pripomočkov

Opis poteka vaje

Za vajo si oglejmo tuneliranje valovanja skozi špranjo med dvema dielektričnima prizmama. Prizmi potrebujemo zato, da lahko valovanje vzbudimo in merimo jakost odbitega ter tuneliranega valovanja v praznem prostoru. Pri uporabi 45-stopinjskih prizem mora biti lomni količnik n večji od korena iz 2 (dielektričnost večja od 2), da dobimo popolni odboj na stranici prizme, ki ustreza hipotenuzi osnovnice.



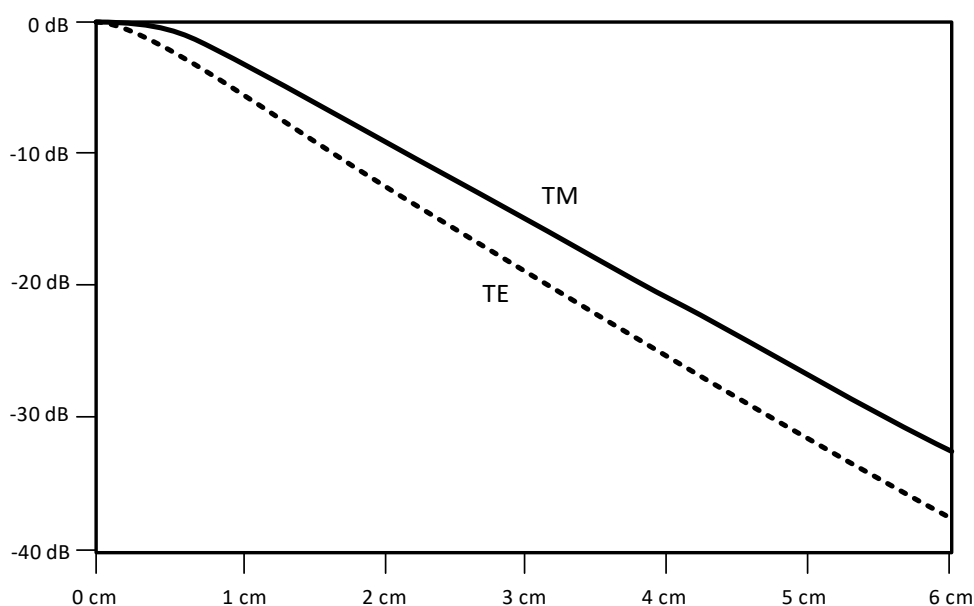
Poskus tuneliranja na svetlobnih frekvencah bi zahteval zelo točne premike obeh prizem, saj ima tuneliranje domet le nekaj valovnih dolžin, se pravi nekaj mikrometrov. Tuneliranje zato lažje opazujemo na nižjih frekvencah, pri večjih valovnih dolžinah. Za laboratorijski poskus so najprimernejši mikrovalovi. Pri frekvenci 15 GHz znaša valovna dolžina v praznem prostoru 2 cm. Prizmi sta izdelani iz polipropilena z relativno dielektričnostjo $\epsilon_r = 2.2 - 2.36$.

Kot izvor valovanja uporabimo mikrovalovni oddajnik na frekvenci 15 GHz z izhodno močjo okoli 30 mW (+15 dBm). Oddajnik napaja anteno, mikrovalovni valovodni lijak, ki seva linearno polarizirano valovanje. Enako anteno uporabimo tudi na sprejemni strani. Sprejemno anteno povežemo na VF merilnik moči. Merilnik moči ima ločeno merilno glavo, ki jo priključimo neposredno na sprejemno anteno, da so izgube čim manjše.

Pri postavljanju vaje pazimo, da so oddajna antena, obe prizmi in sprejemna antena točno orientirani in poravnani v vrsto, saj je jakost tuneliranja močno odvisna od vpadnega kota valovanja. Pravzaprav iščemo maksimalno sprejemno moč, kar poskušamo doseči z majhnimi premiki sprejemne antene. Pri izvedbi vaje nas motijo tudi odbiti valovi na ostalih straneh prizem in drugih predmetih v sobi.

Pri vaji skušamo izmeriti jakost tuneliranega valovanja kot funkcijo razdalje d med prizmama. Pri tem z drugo sprejemno anteno merimo moč odbitega vala, s čimer skušamo izmeriti slabljenje odbitega valovanja zaradi tuneliranja.

Slabljenje tuneliranja je seveda odvisno od polarizacije vpadnega valovanja. Polarizacijo valovanja izbiramo tako, da primerno zasukamo oddajno in sprejemno anteno. Prizem ne obračamo, saj so pretežke.



Slika 4: Slabljenje tuneliranega valovanja

Izračunano slabljenje tuneliranja je za dani primer prikazano na Sliki 4. Pri vaji skušamo izmeriti in narisati dve podobni krivulji za TE in TM polarizaciji vpadnega valovanja. Rezultat vaje seveda vsebuje celo vrsto motilnih pojavov, kot so odboji na vstopni in izstopnih straneh prizem ter odboji od drugih predmetov v sobi. Uporabljene antene so premajhne, da bi v prizmah dobili povsem ravne valovne fronte.



Ker je vaja časovno zahtevna, si delo razdelimo med dve skupini. 1. skupina izmeri TE polarizacijo, druga skupina pa vajo ponovi še za TM polarizacijo vpadnega valovanja. Slika 3 prikazuje postavitev anten za merjenje tuneliranja TM polarizacije.

Naloga

1. Izmerite moč tuneliranega in odbitega vala, pri razmakih med prizmama od 0 cm do 5 cm za obe polarizaciji.
2. Rezultate izrišite na graf.
3. Na poseben graf izrišite moč tuneliranega vala za obe polarizaciji hkrati.