

VAJA 37. - MERITEV BRILLOUINOVEGA SIPANJA

37.1. Nelinearno sipanje

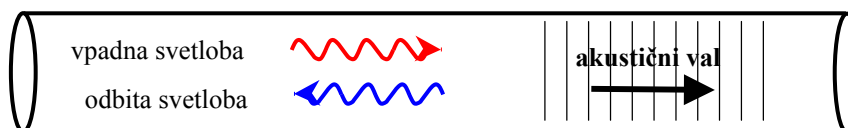
Sipanje svetlobe je pojav, pri katerem se svetloba razpršuje in zato slabi. Povzročajo ga zelo različni pojavi. Razlikujemo linearno (elastično) sipanje, pri katerem se frekvenca razpršene svetlobe ohranja, in nelinearno (neelastično sipanje), pri katerem se frekvenca razpršene svetlobe spremeni.

Primer linearnega sipanja je Rayleighovo sipanje, ki je glavna komponenta slabljenja v optičnem vlaknu. Trk fotona s snovjo je elastičen, foton ohranja svojo energijo, s tem pa tudi svojo frekvenco. Pri nelinearnem sipanju je del moči vhodne svetlobe izgubljen in absorbiran v snov vlakna.

Med neelastična sipanja prištevamo stimulirano Ramanovo sipanje (SRS) in stimulirano Brillouinovo sipanje (SBS). Postopka si je mogoče predstavljati kot pretvorbo vstopajočega fotona v foton z nižjo energijo in paket vibracijske energije, ki je znan kot fonon. Fonon je kvant nihanja kristalne mreže in ima podobno vlogo kot foton v elektromagnetnem valovanju. Celotna energija pred sipanjem in po njemu mora biti enaka, torej se mora energija vhodnega fotona razdeliti na fonon in foton, ki se sipa. Ker je frekvenca fotona premosorazmerna njegovi energiji ($W=hf$), ima foton, ki nastane s sipanjem, nižjo frekvenco kot vstopajoči foton. V obeh primerih (SRS in SBS) vstopajoči val imenujemo črpalni signal, medtem ko val nižje frekvence, ki je nastal s sipanjem, imenujemo Stokesov val. Glavna razlika med SBS in SRS se skriva v tipu fonona, ki je generiran. V primeru SRS je generiran visoko energijski optični fonon, v primeru SBS je generiran nizko energijski akustični fonon. Frekvenčna razlika med črpalnim in Stokesovim valom je potemtakem mnogo večja v primeru SRS kot pri SBS. Tipične vrednosti frekvenčne razlike med črpalnim in Stokesovim valom so 10 GHz ($\sim 0,08$ nm pri 1550 nm) za SBS in 10 THz (~ 80 nm pri 1550 nm) za SRS. Nadaljnja ključna razlika med pojavoma sipanja je, da val, ki nastane s sipanjem pri SBS, potuje nazaj. SBS Stokesov val se torej vrača na vhod optičnega vlakna, medtem ko Stokesov val, ki je posledica SRS, potuje v obe smeri skupaj s črpalnim valom. Obe vrsti sipanja imata tako imenovan »prag črpalne moči«, nad katerim se moč, ki se pretvori v Stokesov val, hitro poveča.

37.2. Stimulirano Brillouinovo sipanje

Brillouinovo sipanje, odkrito leta 1964, je interakcija svetlobe v vlaknu z longitudinalnim akustičnim valom, ki povzroča zgoščine in razredčine stekla in s tem modulacijo lomnega količnika. Akustični val je lahko vzbujen termično (spontano Brillouinovo sipanje) ali ga vzbuja svetlobni val z elektrostrikcijo (stimulirano Brillouinovo sipanje). Frekvenčna razlika med vpadno in sipano svetlobo je po pričakovanju majhna spričo majhne energije akustičnega fonona.



Slika 37.1. – Prikaz pojava stimuliranega Brillouinovega sipanja.

Brillouinovo sipanje razložimo kot parametrično interakcijo svetlobnega signala (črpalke), sipane svetlobe (po frekvenci navzdol premaknjene Stokesovega vala) in akustičnega vala. Akustični val se vede kot potujoča Braggova uklonska mrežica, ki sipa svetlobo nazaj, kot prikazuje slika 37.1. Sipana svetloba je premaknjena za Dopplerjev premik

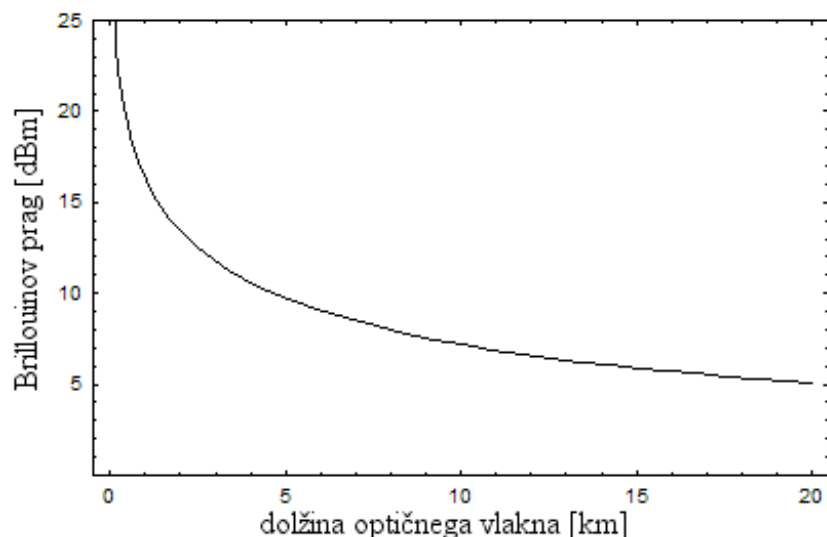
$$F=2nV/\lambda,$$

kjer je λ/n valovna dolžina svetlobe v mediju in V hitrost širjenja akustičnega vala, ki v snovi SiO_2 znaša $5,96 \times 10^3$ m/s. Pri $\lambda_s=1550$ nm in $n=1,451$ znaša Dopplerjev premik okoli $F=11,5$ GHz. Frekvenčni pas Δf sipane svetlobe je zelo ozek in znaša od 10 MHz do 30 MHz.

Stimulirano Brillouinovo sipanje se znatno poveča, ko moč črpalke doseže Brillouinov prag. Brillouinov prag optičnega vlakna je definiran kot moč vhodne črpalke, pri kateri je nazaj sipajoči Stokesov val na vhodu enak moči prepuščenega črpalnega signala na izhodu. Podaja, koliko moči je lahko sklopljeno v vlakno preden postane SBS resna omejitev. Pragovno moč nemoduliranega signala $P_{BP,CW}$ za vlakno dolžine L je mogoče oceniti s približnim izrazom

$$P_{BP,CW} = 21 \cdot \frac{K_p \cdot A_{eff}}{g_B \cdot L_{eff}},$$

kjer je Brillouinov koeficient ojačenja $g_B=5 \times 10^{-11}$ m/W, A_{eff} je efektivni prerez vlakna, L_{eff} je efektivna dolžina vlakna in K_p faktor polarizacije. Vrednost faktorja polarizacije je odvisna od tega, ali črpalni ter Stokesov val ohranjata polarizacijo vzdolž vlakna ($K_p=1$) ali sta njuni polarizaciji povsem premešani ($K_p=1,5$) ali ortogonalni ($K_p=2$). Zgornji izraz omejuje največjo dopustno optično moč, ki jo smemo sklopiti v vlakno. SBS torej znižuje prenešeno moči zaradi nastanka Brillouinove nazaj sipajoče komponent. Brillouinov prag je odvisen od dolžine optičnega vlakna, kot to prikazuje graf na sliki 37.3.



Slika 37.3. – Brillouinov prag v odvisnosti od dolžine optičnega vlakna s slabljenjem $\alpha=0,2$ dB/km, Brillouinovim koeficientom ojačenja $g_B=4\times 10^{-11}$ m/W in efektivno površino vlakna $A_{eff}=80$ mm.

37.3. Seznam potrebnih pripomočkov

Za izvedbo vaje potrebujemo:

- (1) DFB laser z možnostjo direktne modulacije,
- (2) dva EDFA,
- (3) dva vlakenska optična smerna sklopnika,
- (4) nastavljiv optični slabilnik,
- (5) kolut enorodovnega optičnega vlakna dolžine 30 km,
- (6) FP optični spektralni analizator,
- (7) generator sinusne napetosti,
- (8) tri optične merilnike moči.

Razporeditev in vezava merilnih pripomočkov je prikazana na sliki 37.4.

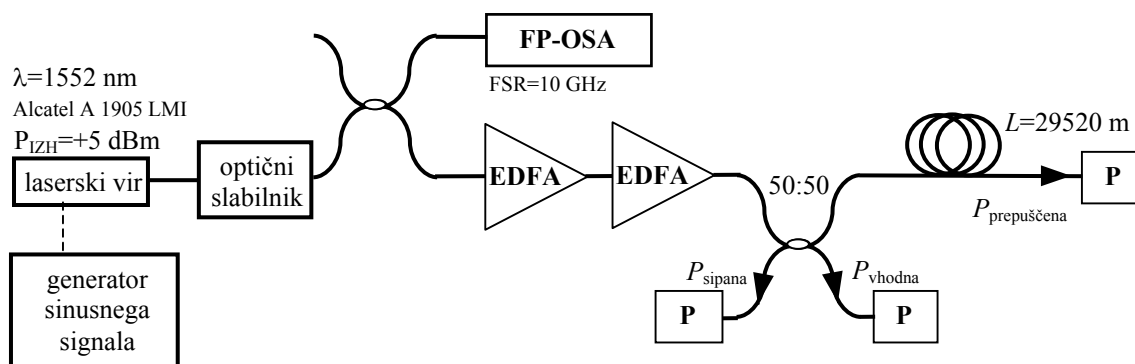
36.4. Obrazložitev in opis poteka vaje

Sipanje v povratni smeri, majhen premik Stokesovega vala in zelo ozek spekter so osnovne lastnosti Brillouinovega sipanja. Posledicam SBS se najlažje izognemo tako, da onemogočimo nastanek SBS.

Prag stimuliranega Brillouinovega sipanja je mogoče precej enostavno izmeriti z uporabo optičnega vlakenskega sklopnika, ki povezuje vhodni in izhodni signal z optičnimi vlakenskimi merilniki moči. Z merilniki moči nadzorujemo vhodno, prepuščeno in sipano optično moč, kot prikazuje slika 37.4.

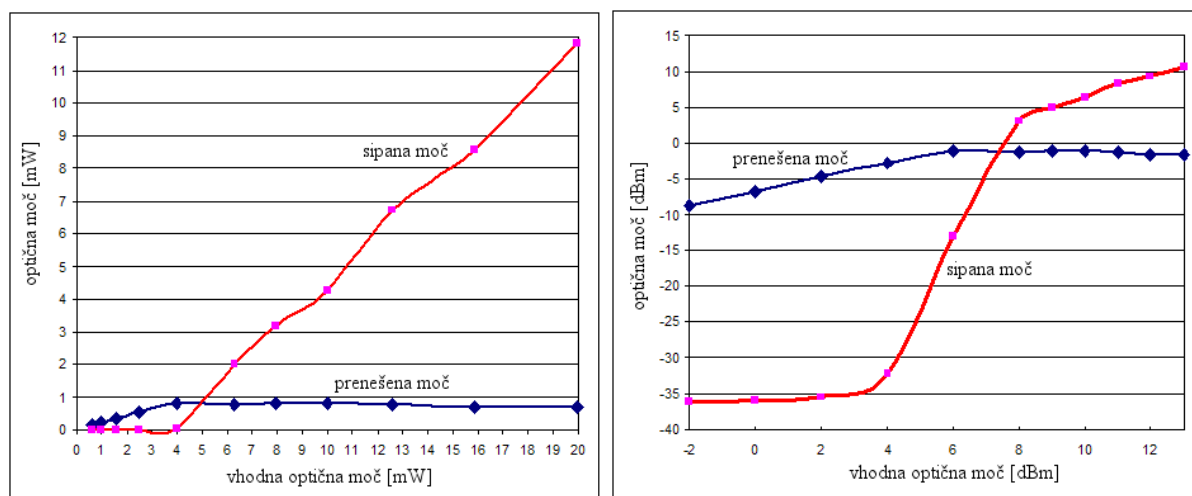
Pri tipičnem podatku $A_{eff} \gg 50$ mm² dobimo P_{BP} v velikostnem redu nekaj mW. Sipanje se torej pojavlja že pri nizkem nivoju optične moči reda nekaj mW in postane kritično pri moči nekaj 10 mW. Resne posledice Brillouinovega sipanja se v praksi pojavljajo pri moči 10 mW, zlasti še, če uporabljamo vire z zelo čistim spektrom. Nad Brillouinovim pragom se moč, ki se pretvori v Stokesov val, hitro poveča. Ker Stokesov val pri Brillouinovem sipanju potuje proti

vhodu, celotna moč na izhodu iz optičnega vlakna ne narašča več linearno z vhodno močjo. Maksimalna vstopna moč postane vklenjena in presežek moči se preprosto odbije nazaj na vhod optičnega vlakna.



Slika 37.4. – Prikaz vezave za opazovanje Brillouinovega sipanja.

Grafa na sliki 37.5 prikazujeta, kakšne so razmere po povečanju vhodne optične moči v enorodovnem optičnem vlaknu. Pri majhnih vhodnih močeh pod 4 mW znaša odbita moč zaradi Fresnelovega odboja od konca vlakna okoli 4%. Če vhodna moč presega 4 mW, se začne Brillouinovo sipanje, ki doseže pri vhodni moči okoli 20 mW 60% konverzijo vpadnega v odbiti val.



Slika 37.5. – Primerjava nazaj sipanega vala proti napredujočemu optičnemu valu v linearnem (levo) in logaritamskem (desno) merilu.

Glavni posledici Brillouinovega sipanja sta navidezna vklenjenost vhodne optične moči in nastanek motečega odbitega vala. Posledično nastali odbiti val najenostavneje preprečimo z uporabo optičnega izolatorja, ki ga montiramo na vhodu optičnega vlakna.

Vzroke za nastanek Brillouinovega sipanja najenostavneje odpravimo z omejitvijo vhodne moči pod nivo Brillouinovega praga, vendar se mejnim vrednostim maksimalne sklopljene svetlobe zaradi Brillouinovega sipanja vedno ne da izogniti.

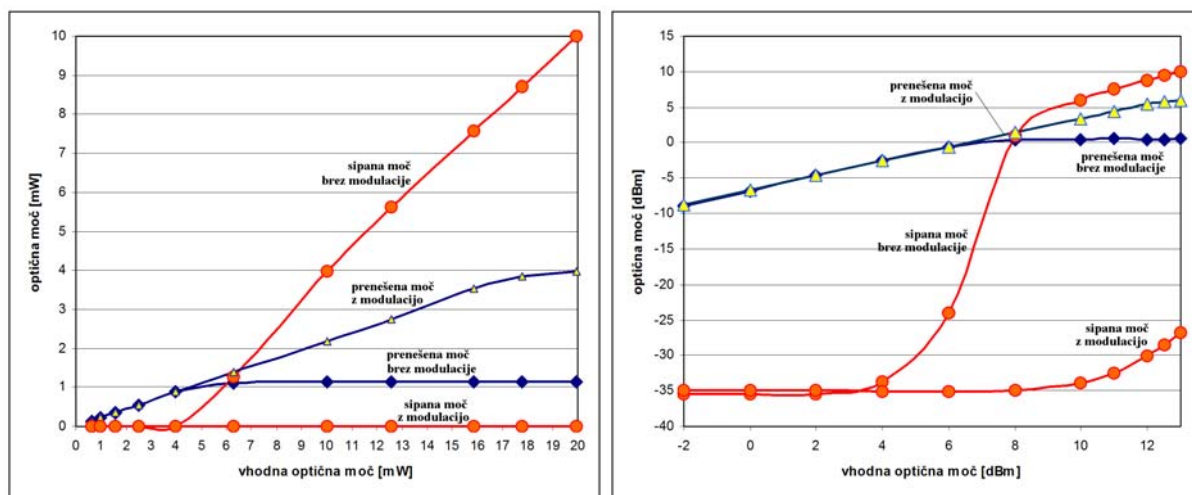
Za odpravljanje nastanka Brillouinovega sipanja je zelo primerna tehnika povečevanja spektralne širine optičnega signala. V primeru spektralno zelo čistih optičnih signalov znaša Brillouinov prag le 1 mW, za spektralno široke signale pa postane razmeroma visok.

Spekter optičnega signala je mogoče razširiti z uporabo drgetajočega vira valovne dolžine. Primerna rešitev je tudi fazna modulacija optičnega signala s frekvenco nekaj MHz.

Do tega lahko pridemo tudi z direktno jakostno modulacijo laserskega izvora, kjer se laser tudi rahlo frekvenčno modulira. Kot modulacijski signal zadostuje šibak radiofrekvenčni signal, katerega frekvenca znaša nekaj MHz.

37.5. Prikaz značilnih rezultatov

Kot rezultat vaje sta grafa na sliki 37.6, ki prikazujeta, kakšne so razmere po povečanju vhodne optične moči v enorodovnem optičnem vlaknu z direktno modulacijo in brez nje. V primeru direktne modulacije sinusnega signala moči -15 dBm in frekvence 14 MHz, se je Brillouinov prag povečal za več kot 8 dB.



Slika 37.6. – Primerjava nazaj sipanega vala proti napredujočemu optičnemu valu v linearnem (levo) in logaritemskem (desno) merilu.

36.6. Vprašanja in naloge vaje

1. Izmeri sipan in napredujoči val v odvisnosti od vhodne optične moči!
2. Izmeri sipan in napredujoči val v odvisnosti od vhodne optične moči v primeru, ko uporabljamo direktno modulacijo laserskega vira!
3. Izmeri optični spekter nemoduliranega in moduliranega laserja!