

VAJA 23. - AKUSTO-OPTIČNI POJAVI

23.1. Uklon svetlobe na zvočnem valovanju

Zvočno (akustično) valovanje je vzdolžno (longitudinalno) mehansko valovanje v plinih, tekočinah in trdnih snoveh. Vsako valovanje opisujeta dve veličini: tok in napetost na električnem vodu, električno in magnetno polje za elektromagnetni val v praznem prostoru ter hitrost delcev snovi in pritisk v snovi za zvočno valovanje.

Lomni količnik snovi za svetlobo je odvisen od gostote snovi in je zato tudi funkcija mehanskega pritiska v snovi. Odvisnost lomnega količnika tekočin in trdnih snovi od pritiska je sicer zelo majhna za praktično izvedljive pritiske. Ker pa je valovna dolžina svetlobe zelo majhna, je dolžina poti svetlobe v snovi običajno zelo velika v primerjavi z valovno dolžino. Velike spremembe faze svetlobnega valovanja zato lahko dosežemo tudi z majhnimi spremembami lomnega količnika, če je le dolžina poti zadosti velika.

Zvočno valovanje predstavlja skupino zgoščin in razredčin, ki se širijo po snovi. Za svetlobo predstavljajo zgoščine področja, kjer je lomni količnik snovi nekoliko večji, razredčine pa področja, kjer je lomni količnik nekoliko manjši od srednjega lomnega količnika snovi. Če se zvočni val širi približno pravokotno na smer širjenja svetlobe, pride do uklona svetlobe na zvočnem valovanju.

Najenostavnejši primer, Raman-Nath-ov uklon svetlobe, je prikazan na sliki 23.1. Pri Raman-Nath-ovem uklonu privzamemo, da je pot svetlobe skozi snov zadosti kratka, da se snov z zvočnim valom obnaša kot enostavna uklonska mrežica, ki modulira fazo vstopajočega svetlobnega žarka. Na izstopu iz uklonske mrežice dobimo šop žarkov. Odkloni žarkov so funkcija zvočne valovne dolžine, ki je kar perioda uklonske mrežice.

Ker je zvočna valovna dolžina Λ dosti večja od valovne dolžine svetlobe λ , so odklonski koti (v radianih!) kar celi mnogokratniki m razmerja valovnih dolžin

$$\varphi_m [\text{rd}] \approx m \cdot \frac{\lambda}{\Lambda},$$

kjer je λ valovna dolžina svetlobe v praznem prostoru in Λ zvočna valovna dolžina v snovi.

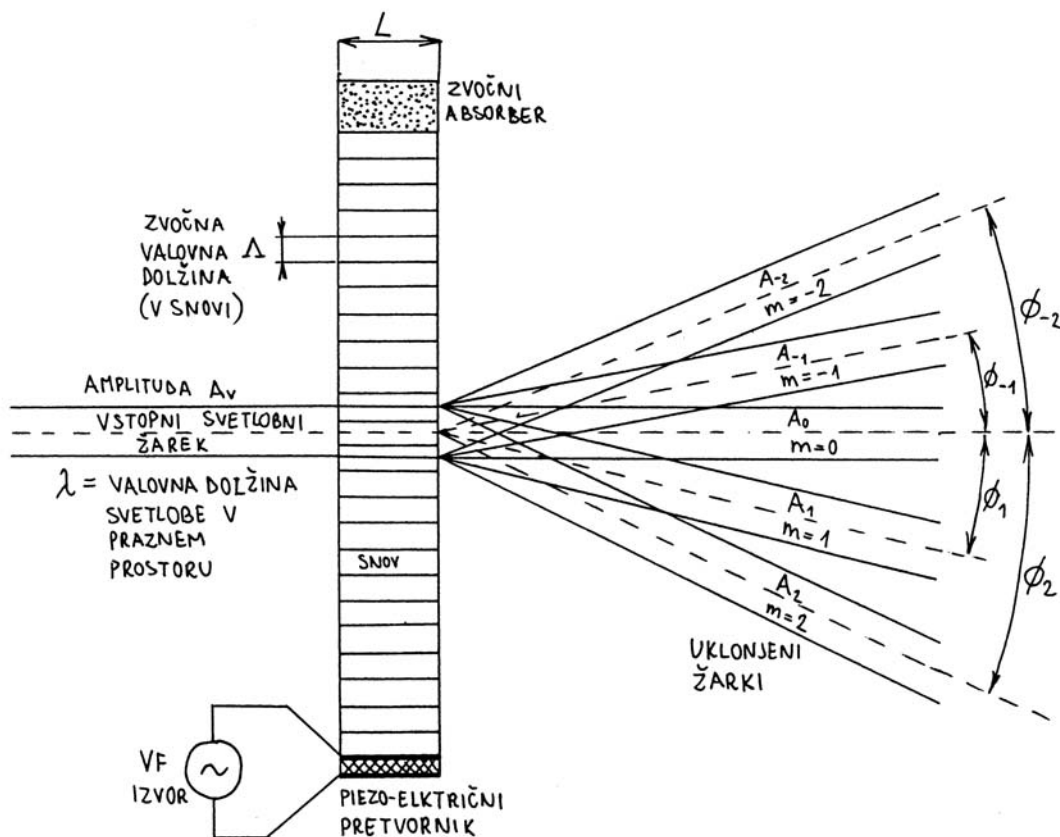
V slučaju sinusnega zvočnega valovanja dobimo sinusno fazno modulacijo valovne fronte svetlobnega žarka. Amplitude uklonjenih žarkov so zato sorazmerne Besselovim funkcijam amplitude fazne modulacije

$$A_m = A_v \cdot J_m(v).$$

Parameter v dobimo kot produkt

$$v = k \cdot \Delta n \cdot L,$$

kjer je $k=2\pi/\lambda$ valovna konstanta svetloba, Δn je maksimalna sprememba (amplituda) lomnega količnika in L dolžina poti v snovi.



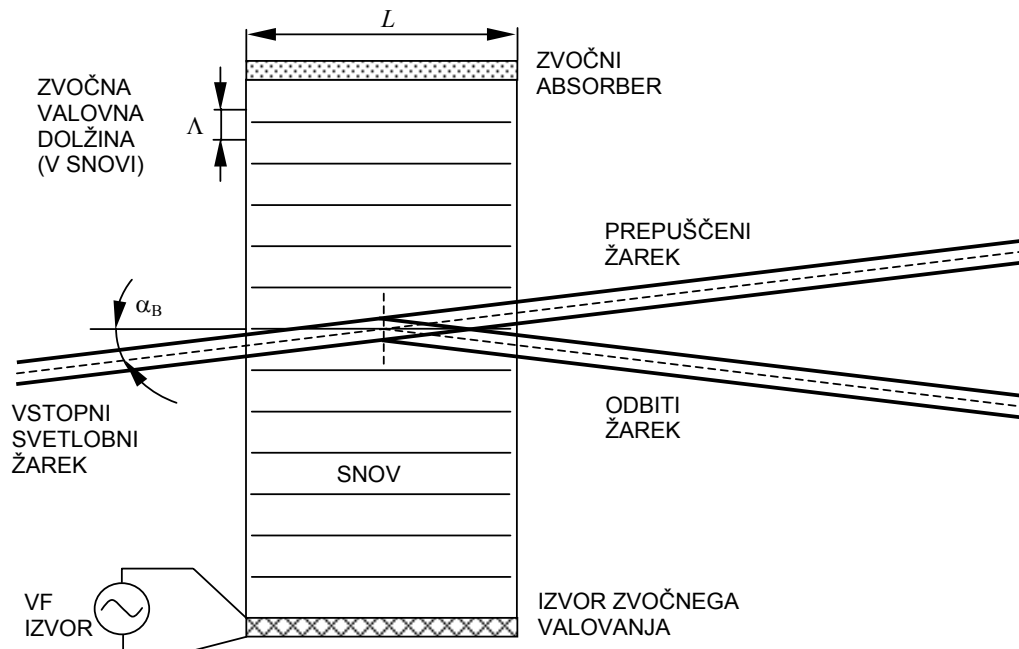
Slika 23.1. – Raman-Nath-ov uklon svetlobe na zvočnem valovanju.

Enačbe za Raman-Nath-ov uklon veljajo takrat, ko je pot svetlobe po snovi z zvočnim valovanjem zadosti kratka. Pri tem sploh ni potrebno, da je pot svetlobe skozi snov kratka v primerjavi z valovno dolžino svetlobe, pač pa, da so odklonski koti žarkov majhni v primerjavi z razmerjem zvočna valovna dolžina (veliki λ) proti dolžini poti svetlobe (L).

Ko je pot svetlobe daljša, dobimo nekoliko drugačne pojave, na primer Bragg-ov odboj svetlobe na zvočnih valovnih frontah, kar prikazuje slika 23.2. Vstopni svetlobni žarek se v obliki širokega snopa žarkov širi poševno navzgor pod majhnim vpadnim kotom α_B glede na navzgor potujočo fronto periodične strukture. Žarek jo deloma prebije, deloma se od nje odbije. Bragov odbojni kot α_B je določen z izrazom

$$\sin(\alpha_B) = \frac{\lambda}{2\Lambda},$$

kjer je λ valovna dolžina svetlobe v praznem prostoru in Λ zvočna valovna dolžina v snovi.



Slika 23.2. – Bragov odboj svetlobe znotraj široke celice.

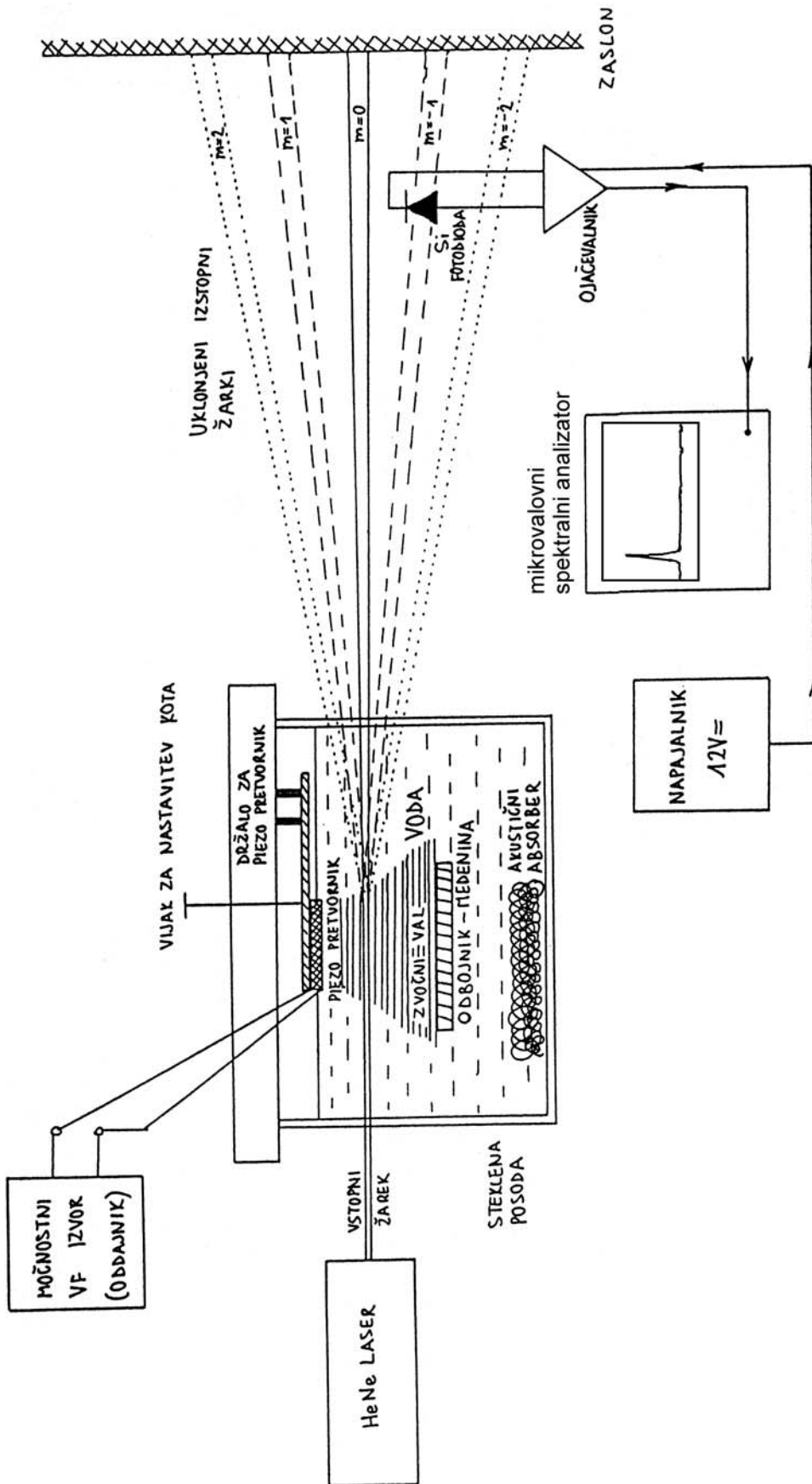
Akusto-optične pojave je najlažje opazovati v tekočinah. Lomni količnik plinov je zelo blizu enote, spremembe zaradi pritiska so še dosti manjše in slabljenje zvočnih valov je zelo visoko, zato je opazovanje akusto-optičnih pojavov v plinih zelo težko. Akusto-optični pojavi se zato izkoriščajo v tekočinah in trdnih snoveh. V trdnih snoveh (steklu) je slabljenje zvoka dosti manjše kot v tekočinah in so zato bolj primerne za višje frekvence (nad 20-50MHz), vendar potrebujemo za enak akusto-optični pojav približno 100-krat večjo zvočno moč kot v tekočinah (vodi).

23.2. Seznam potrebnih pripomočkov

Za izvedbo vaje potrebujemo:

- (1) Dva HeNe laserja (rdeč/rumen/oranžen) z napajalnikom in podstavkom.
- (2) Piezoelektrični pretvornik na podstavku z mikrometrskim vijakom.
- (3) Visokofrekvenčni generator v področju 2MHz do 15MHz z nastavljivo izhodno močjo do 3W.
- (4) Posodo s prozornimi stenami, napolnjeno z vodo.
- (5) Akustični odbojnik (medeninasta ploščica na podstavku).
- (6) Kos akustičnega absorberja (steklena volna).
- (7) Zaslona z milimetrskim papirjem.
- (8) Hitro Si fotodiodo z ojačevalnikom in napajalnikom.
- (9) Mikrovalovni (radijski) spektralni analizator 0-1GHz.
- (10) Akusto-optični modul s stekleno celico.

Namestitev pripomočkov za opazovanje akusto-optičnih pojavov je prikazana na sliki 23.3.



Slika 23.3. – Namestitev pripomočkov za opazovanje akusto-optičnih pojavov.

23.3. Obrazložitev in opis poteka vaje

Vajo sestavimo na ustrezni mizi v zaporedju, kot poteka svetlobni žarek od izvora svetlobe do zaslona. Kot izvor svetlobe uporabimo HeNe laser z izhodnim žarkom premera okoli 1mm. Ker so odklonski koti zelo majhni (v velikostnem razredu nekaj miliradianov), uporabimo kot zaslon kar zid sobe na razdalji nekaj metrov od akusto-optične celice.

Kot aktivno snov v akusto-optični celici uporabimo navadno (vodovodno) vodo. Vodo nalijemo v prozorno (stekleno) posodo z ravnimi stenami. Zvočno valovanje v vodi vzbudimo s piezo-električnim pretvornikom. Pretvornik je okrogla ploščica iz piezokeramike, električni signal pripeljemo na kovinski elektrodi na obeh metaliziranih straneh ploščice. Piezokeramika se v električnem polju ob eni elektrodi skrči, ob drugi pa raztegne, in tako proizvaja zvočno valovanje.

Za šolski poskus je najbolj primerna frekvenca zvočnega valovanja v področju okoli 10MHz. Pri hitrosti zvočnega valovanja okoli 1.5km/s v vodi znaša zvočna valovna dolžina okoli 150 μ m. Ker je valovna dolžina HeNe laserja 632.8nm, znaša kot med posameznimi uklonjenimi žarki okoli 4 miliradiane oziroma 4 milimetre na 1 meter oddaljenem zaslonu. Zaslon zato postavimo čim dlje, da lahko bolj natančno izmerimo razdalje med posameznimi žarki.

Slaba stran vseh akusto-optičnih naprav je, da potrebujejo za delovanje razmeroma visoke zvočne moči v velikostnem razredu 1W v tekočinah ali 100W v trdnih snoveh. Piezo-električni pretvornik moramo zato napajati z močnostnim visokofrekvenčnim izvorom (kratkovalovnim oddajnikom). Zaradi lastnih rezonanc ter odbitih valov v snovi se impedanca in učinkovitost piezo-električnega pretvornika zelo spreminja, kar postavlja dodatne zahteve za visokofrekvenčni izvor. Pretvornik zato običajno uporabljamo na njegovi mehanski rezonančni frekvenci.

Piezo-električni pretvornik je vgrajen na podstavek z vijakom za fino nastavljanje kota med svetlobnim žarkom in valovnimi frontami zvočnega valovanja. Ta nastavitev je potrebna zato, ker je premer pretvornika približno 100-krat večji od zvočne valovne dolžine. Največji akusto-optični pojav dobimo takrat, ko je vstopni žarek vzporeden z zvočnimi valovnimi frontami. Ko pot žarka prebada več kot eno valovno fronto, akusto-optični pojav skoraj izgine.

Ker želimo opazovati uklon svetlobe na potujočem zvočnem valovanju, so odboji zvoka na stenah posode nezaželeni. Odboj zvoka na dnu posode povzroča stojno zvočno valovanje med pretvornikom in dnom posode. Posledica stojnega valovanja je nestabilna vhodna impedanca pretvornika in nestabilna amplituda zvoka (zelo hitre spremembe pri vrtenju vijaka za nastavljanje kota), kar otežuje meritve. Odbite zvočne valove zadušimo z zvočnim absorberjem.

Kot absorber zadošča dovolj velik kos tkanine iz steklene volne oziroma poševno postavljena bakelitna ploščica, ki zvočni val razprši v več valov majhne amplitude, ki opazovanih pojavov ne motijo več. Če pa želimo opazovati akusto-optične pojave na stojnem zvočnem valu, potem postavimo v

posodo debelo medeninasto ploščico na primeren podstavek, da se nahaja čimbližje žarku in tako zmanjšamo slabljenje odbitega zvočnega vala v vodi.

23.4. Prikaz značilnih rezultatov

Glede na izbrano valovno dolžino svetlobe λ , frekvenco (valovno dolžino Λ) zvoka ter premerom pretvornika (dolžino poti L v snovi) lahko z opisano napravo ravno še opazujemo Raman-Nath-ov uklon, vsaj za nekaj nižjih redov uklonjenih žarkov. Napravo najprej nastavimo tako, da dobimo na zaslonu čim več uklonjenih žarkov. Pri tem iščemo maksimum z nastavljanjem kota med pretvornikom in žarkom ter premikamo pretvornik prečno na žarek, da gre žarek skozi zvočni val tam, kjer je le ta najširši. Po potrebi popravimo tudi frekvenco generatorja, saj pretvornik ni enako učinkovit na vseh frekvencah. Pri spreminjanju frekvence se seveda uklonska slika širi ali oži.

Nato poskusimo spreminjati moč generatorja. Pri zelo majhni moči ne dobimo uklona. Z večanjem moči se pojavita najprej žarka prvega reda in končno še žarki višjih redov. S pojavom žarkov višjih redov upada jakost neuklonjenega žarka ($m=0$) in pri ustrezni zvočni moči skoraj izgine.

Zatem zvočni absorber zamenjamo z medeninasto ploščico. Zaradi odbitih zvočnih valov se uklonska slika zelo hitro spreminja s spreminjanjem vpadnega kota. V maksimumu dobimo še več uklonjenih žarkov, ker je zaradi odbitega vala sprememba lomnega količnika še večja. Zaradi stojnega vala jakost neuklonjenega žarka ($m=0$) navidezno ne upada, v resnici pa so vsi žarki zdaj modulirani s sodimi harmonskimi frekvencami zvočnega valovanja.

Končno izmerimo razmik uklonjenih žarkov in iz frekvence generatorja, valovne dolžine svetlobe ter razdalje do zaslona izračunamo hitrost razširjanja zvoka v vodi. S fotodiodo, ki je priključena na mikrovalovni (radijski) spektralni analizator, preverimo tudi modulacijo posameznih uklonjenih žarkov. Pri potujočem zvočnem valovanju je modulacija zanemarljiva, pri stojnem valu pa dobimo modulacijo z dvojno frekvenco, ki je najmočnejša na žarkih 1. reda.

Za konec preverimo še delovanje akusto-optičnega modula z Bragg-ovo stekleno celico. Modul s stekleno celico postavimo med izvor svetlobnega žarka in zaslon. Kot izvor svetlobe uporabimo HeNe laser z izhodnim žarkom premera okoli 1mm, ki ga moramo natančno pociljati v stekleno celico. Ker so odklonski koti tudi v tem primeru zelo majhni uporabimo kot zaslon kar zid sobe na razdalji nekaj metrov od akusto-optične steklene celice. Stekleno celico krmilimo s pravokotnim signalom 0-5V nizke frekvence (približno 1Hz), kar omogoči, da opazujemo utripanje odklonov kar s prostim očesom.

23.5. Vprašanja in naloge vaje

1. Izračunaj hitrost razširjanja zvoka v vodi!
2. Izračunaj hitrost razširjanja zvoka v steklu!
3. Kakšna je razlika med Raman-Nath-ovim uklonom in Bragg-ovim odbojem?

