

AKUSTO-OPTIČNI MODULATOR ZA LASER

Matjaž Vidmar, S53MV

1. Svetlobni modulatorji

V januarski številki CQ ZRS sem opisal helij-neonsko lasersko cev in ustrezen napajalnik. Laserska cev resda predstavlja komplet oddajnik za 474THz, le še modulirati ga je treba, da lahko s takšno napravo prenašamo informacije in z njo naredimo radijsko zvezo. Za naše radioamaterske zveze pride v poštev predvsem amplitudna (jakostna) modulacija svetlobe. Fazna ali frekvenčna modulacija svetlobnega žarka je sicer tehnično izvedljiva, dosti težje pa je takšen signal nazaj demodulirati.

Najenostavnejša modulacija laserskega žarka je mehanska modulacija, kot je to prikazano na Sliki 1. Žarek enostavno prekinjamo ali odklanjamo z ustreznim mehanizmom. Seveda je pri takšnem načinu modulacije gornja frekvenčna meja močno omejenana na nekaj sto Hz oziroma nekaj kHz.

Za enostavno zvezo v Morzejevi telegrafiji je treba žarek najprej modulirati s primerno zvočno frekvenco, da ga na sprejemni strani z lahkoto ločimo od ostalih izvorov svetlobe. Za to delo je najprimernejši ventilatorček iz računalniškega napajalnika, ki ima lopatke iz črne plastike, se napaja na 12V enosmerne, ima majhno porabo, tiho teče ter modulira žarek s frekvenco okoli 500Hz.

Modulirani žarek je treba potem le še prekinjati s telegrafsko tipko, po možnosti s pomočjo elektromagneta, ki odmika zaslonko na žarku. Na sprejemni strani potrebujemo le fotodiodo (lahko tudi fototranzistor ali fotopomoževalko), priključeno na nizkofrekvenčni ojačevalnik in zvočnik. Domet naprave znatno povečamo tako, da postavimo sprejemno fotodiodo v gorišče večje leče.

S takšnimi enostavnimi napravami so ameriški radioamaterji dosegli že pred mnogimi leti domet več sto kilometrov med gorskimi vrhovi v kristalno čistem ozračju arizonske puščave. Zato ne vidim nobenega razloga, da ne bi s takšnimi enostavnimi napravami začeli s prvimi poskusi na svetlobnih frekvencah tudi pri nas.

Z mehansko modulacijo si seveda ne moremo privoščiti kaj dosti več kot ročno tipkane Morzejeve telegrafije. Za silo bi se verjetno dalo prenašati tudi zvočne signale, to pa je tudi gornja frekvenčna meja mehanskih modulatorjev. Glede na frekvenco nosilca 474THz (za HeNe laser) bi seveda želeli dosti več.

Laser lahko moduliramo tudi z modulacijo napajalnika. To je najbolj običajen način moduliranja polprevodniških laserjev vse do (modulacijskih) frekvenc nekaj GHz. Helij-neonski laser se da modulirati preko izvora napajanja do frekvenc nekaj sto kHz. Problem je v tem, da je tako dobljena modulacija zelo plitva: pri manjšanju toka skozi HeNe cev sama cev zelo hitro povsem ugasne, pri večanju toka pa kmalu pridemo v nasičenje. Če cev ugasne, potrebuje napajalnik določen čas za ponoven vžig cevi in tega pri moduliranju ne smemo dopustiti.

V profesionalni tehniki se pogosto uporabljajo elektro-optični modulatorji. Enosmerno električno polje povzroči v nekaterih snoveh različne vrste dvolomnosti. Če takšen kos snovi vgradimo med dva polarizatorja

svetlobe, lahko z enosmernim ali nizkofrekvenčnim električnim poljem moduliramo jakost prepuščene svetlobe.

Najbolj znan primer elektro-optičnega modulatorja so LCD prikazovalniki, ki sicer delujejo zelo počasi, ampak pri nizkih napetostih in majhnih močeh. Z uporabo drugačnih snovi se da doseči dosti hitrejšo delovanje vse do modulacijskih frekvenc v GHz področju, pri nekoliko višjih napajalnih napetostih in seveda večjih močeh. Za nas radioamaterje je neugodno predvsem to, da s težavo pridemo do potrebnih sestavnih delov, elektro-optičnih kristalov in polarizatorjev, ter da se znaten del izhodne moči laserja izgubi v polarizatorjih.

V profesionalni laserski tehniki se pogosto uporabljajo tudi akusto-optični modulatorji. Akusto-optični modulator lahko dela do modulacijskih frekvenc nekaj desetih MHz in lahko modulira laserje velikih moči, saj se odvečna svetlobna moč ne izgublja v samem modulatorju, pač pa se laserski žarek razprši v snop žarkov. Delovanje akusto-optičnega modulatorja tudi ni odvisno od polarizacije svetlobe. In končno, kar je za radioamaterje verjetno najpomembnejše, akusto-optični modulator se da enostavno izdelati doma iz priročnih in cenениh sestavnih delov.

2. Razširjanje svetlobe skozi zvočno valovanje

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 svetlobe. 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 2. Pojav je dobil ime po dveh fizikih, ki sta pred približno pol stoletja (takrat še brez laserja) prvič uspela opazovati in opisati ta pojav. 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 snovi dobimo še vedno snop svetlobe približno enakega preseka, svetlobne valovne fronte pa zaradi spreminjajočega se lomnega količnika snovi niso več ravne. Izstopni snop svetlobe zato v resnici vsebuje šop žarkov. Odkloni posameznih žarkov so funkcija zvočne valovne dolžine (velika črka λ), ki je kar perioda uklonske mrežice.

Ker je zvočna valovna dolžina dosti večja od valovne dolžine svetlobe, so odklonski koti (v radianih!) približno kar mnogokratniki razmerja valovnih dolžin. V slučaju sinusnega zvočnega valovanja dobimo sinusno fazno modulacijo valovne fronte svetlobnega žarka. Jakosti uklonjenih žarkov so zato

sorazmerne Besselovim funkcijam $J_m(v)$ amplitude fazne modulacije. Parameter v dobimo kot produkt valovne konstante svetlobe, max. spremembe (amplitude) lomnega količnika (Δn) in dolžine poti žarka v snovi (L).

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).

3. Izdelava akusto-optičnega modulatorja

Profesionalni laserski modulatorji običajno izkoriščajo akusto-optični pojav v kosu prozorne trdne snovi (stekla). Zvočno valovanje, ultrazvok s frekvenco v velikostnem razredu 25MHz, vzbudimo s pretvornikom iz piezo keramike. Piezo pretvornik je pritrjen (prilepljen) na samo prozorno snov zaradi čimboljšega prenosa ultrazvoka.

Tudi sam sem najprej poskusil izdelati takšen modulator, seveda z uporabo priročnih sestavnih delov. Keramični piezo pretvorniki se na primer uporabljajo v 64-mikrosekundnem ultrazvočnem kasnilnem vođu, ki se uporablja v vsakem barvnem televizorju PAL ali SECAM. Po dva takšna pretvornika sta že pritrjena na kos stekla, ki služi kot zvočni kasnilni vod vrste BAW (Bulk Acoustic Wave) v frekvenčnem pasu barvnega podnosilca okrog 4.433MHz.

Za poskus sem previdno razdril star televizijski vrstični kasnilni vod. Največ časa mi je vzelo zelo zamudno brušenje matiranih stranic stekla, da se laserski žarek ni razpršil. Rezultat je bila popolna polomija: akusto-optičnega pojava nisem uspel opaziti, male piezo pretvornike pa sem uničil že z visokofrekvenčnim generatorjem moči komaj nekaj W.

Brskanje po knjigah je pokazalo, zakaj moj poskus ni mogel uspeli. Za delovanje akusto-optičnega modulatorja v steklu potrebujemo ultrazvok moči okrog 100W, mali piezo pretvorniki na TV vrstičnih kasnilnih vodih pa ne zdržijo kaj dosti več kot 1W moči. Iz knjig sem tudi izvedel, da je akusto-optični pojav dosti lažje opazovati v (prozornih) tekočinah, kjer potrebujemo približno 100-krat manjšo moč ultrazvoka oziroma zadošča že 1W moči.

Uspešna praktična izvedba akusto-optičnega modulatorja je prikazana na Sliki 3. Kot snov izberemo kar navadno vodovodno vodo, ultrazvočno valovanje pa vzbudimo s piezo pretvornikom. Kot piezo pretvornik uporabimo mali piezo zvočnik ali piezo piskač, to je okroglo medeninasto ploščico premera okrog 20-40mm, na katero je prilepljen nekoliko manjši disk iz piezo keramike. Takšni piezo piskači se na veliko uporabljajo v hišnih računalnikih in otroških igračkah in jih lahko kupimo v vsaki trgovini z elektronskimi sestavnimi deli za približno 100 tolarjev/kos.

V dveh zgrajenih prototipih sem uporabil piezo piskač premera 27mm, ki ga tovarna Mehano iz Izole vgrajuje v otroške telefone in druge igrače. Na tem piskaču ima piezokeramični disk premer 20mm, oziroma več kot 30000 valovnih dolžin helij-neonskega laserja. Akustooptični pojav sem uspel opazovati v frekvenčnem področju med 2MHz in 14MHz. Pri tem spodnjo frekvenčno mejo določa divergenca uporabljenega laserskega žarka, saj so odkloni žarkov premosorazmerni frekvenci ultrazvoka. Gornjo frekvenčno mejo določa verjetno sama piezokeramika, saj nad 15MHz nisem uspel opaziti ničesar.

Najboljše rezultate dosežemo na (tretji overtonski?) resonanci piezo piskača, v mojem slučaju nekje med 11 in 12MHz.

Če upoštevamo hitrost zvoka v vodi (okoli 1.5km/s) dobimo na teh frekvencah ultrazvočno valovanje z valovno dolžino okrog 120-140 mikrometrov (veliki lambda v enačbah na Sliki 2.). Uklonski koti laserskega žarka bojo zato majhni, komaj nekaj miliradianov. Uklonsko sliko bomo dobili šele na zaslону, ki je oddaljen vsaj kakšen meter od naše naprave.

Največji Raman-Nath-ov uklon dobimo takrat, ko je laserski žarek natančno pravokoten na smer razširjanja zvočnega valovanja oziroma vzporeden z zvočnimi valovnimi frontami. Če žarek prebada več valovnih front, ne dobimo skoraj nikakršnega uklonskega pojava, saj se vpliv zgoščin in razredčin med sabo izniči. Ker ima steber zvočnega valovanja premer približno 20mm, zvočna valovna dolžina pa je v velikostnem razredu desetinke milimetra, je treba zagotoviti vzporednost laserskega žarka s površino piezo pretvornika s točnostjo vsaj 0.1 stopinje!

To najlažje storimo tako, da piezo piskač montiramo na podolgovat kos vitroplasta, ki ga potem ukrivljamo z vijakom za točno nastavitvev kota. Piezo piskač oddaja ultrazvok na obeh straneh, tako da ga lahko vgradimo z mečenasto ali pa s keramično stranjo proti tekočini. Pri spajkanju žic na piskač pa je potrebna previdnost, še posebno za žičko, ki gre na srebrno metalizacijo na keramiki. Uporabimo čim tanjšo žico in minimalno količino cina, žičko pa pricinimo ob robu diska, daj čimmanj motimo izstopajoči ultrazvočni val.

V vsakem slučaju priporočam uporabo piskača, ki ima eno samo srebrno metalizirano elektrodo. Na tržišču dobimo tudi takšne piskače, ki imajo majhno dodatno elektrodo za izdelavo oscilatorja, kar pa v našem slučaju delovanja na več kot 1000-krat višji frekvenci kazi izstopni zvočni val. VF signal pripeljemo na piezo ploščico po kosu koaksialnega kabla, ki ga prej pritrdimo tudi na ploščico iz vitroplasta, da z zvijanem kabla ne polomimo piezo ploščice.

4. Visokofrekvenčni generator za piezo pretvornik

Piezo pretvornik napajamo s signalom frekvence nekje med 2MHz in 15MHz ter moči nekaj W, za kar potrebujemo ustrezen generator. Glede na potrebno frekvenco in moč potrebujemo kar kratkovalovni oddajnik male moči. Piezo pretvornik lahko zato krmilimo kar z amaterskim kratkovalovnim oddajnikom, v napajalni vod pa obvezno vstavimo uporovni slabilec, predvsem da zagotovimo dobro prilagoditev bremena in ne poškodujemo oddajnika.

Ker sam nisem razpolagal s primernim kratkovalovnim oddajnikom, ki bi pokrival širši frekvenčni pas, sem za poskuse zgradil vezje na Sliki 4. Prikazani VF izvor vsebuje kristalni oscilator in krmilno stopnjo z vezjem 74HC04 ter izhodni ojačevalnik s CBjaškim izhodnim tranzistorjem 2SC2078. Za poskuse s piezo pretvornikom zadošča, če moremo frekvenco VF izvora nastavljati v korakih po približno 500kHz. Enostavna rešitev je kristalni oscilator in škatla računalniških kristalov, ki jih imamo tako ali drugače vedno pri roki za preizkus vsakovrstnih vezij.

Izhodna stopnja VF izvora ne vsebuje nobenega nizkoprepustnega sita, saj to ni oddajnik in se nam ni treba bati, da bi izsevali neželjene harmonike. Prilagoditev izhodne impedance piezo pretvornika pa je dosti bolj nerodna reč. Impedanca piezo pretvornika je na teh frekvencah zelo nizka, komaj nekaj ohmov, in je zelo spremenljiva s frekvenco.

Za prilagoditev impedance sem uporabil transformator na feritnem obročku zunanjega premera 32mm, iz ferita z visoko permeabilnostjo za širokopasovne transformatorje, balune in podobno (žal nimam več podatkov o feritu samem). Skozi obroček sem petkrat pretaknil štirižilni ploščat kabelček in posamezna navitja potem povezal zaporedno. Eno od navitij sem stalno obremenil z žarnico 12V/0.1A, da sem preprečil

samooscilacije vezja ob najbolj čudnih impedancah bremena. Žarnica je tudi dober pokazatelj, kaj VF izvor sploh počne.

Izhodna stopnja vsebuje tudi pretikalo za prilagoditev impedance v različnih frekvenčnih območjih. V frekvenčnem območju od 2 do 5MHz se najboljše izkaže uporaba celotnega navitja transformatorja s prenosnim razmerjem 1:4. V frekvenčnem področju od 9 do 14MHz je impedanca piezo pretvornika višja, verjetno tudi zaradi vpliva skoraj meter dolgega 50-ohmskega kabla do VF izvora, ter uporabljamo prenosno razmerje 1:2. Med 5 in 9MHz moj piezo pretvornik ni hotel delati, verjetno zato ne, ker je takrat debelina piezo-keramične ploščice zelo blizu polovici zvočne valovne dolžine. Če mi je v tem frekvenčnem področju vendarle uspelo dobiti akusto-optični uklon, so uklonski koti ustrezali drugemu harmoniku VF generatorja!

Vezje VF izvora je prirejeno za napajanje z laboratorijskim napajalnikom z nastavljivo izhodno napetostjo v področju od 8 do 20V. Pri uporabi pazimo predvsem na tokovno porabo in temperaturo hladilnega rebra tranzistorja 2SC2078, sicer ta ne bo preživel trpinčenja. Pozor! Oklop izhodnega VF kabla ni na potencialu mase vezja, pač pa na pozitivnem polu napajalnika!

5. Uporaba akusto-optičnega modulatorja

Predstavljeni VF izvor kot tudi izvedba akusto-optičnega modulatorja sta seveda mišljena predvsem za poskuse. Pravi modulator bi moral vsebovati VF izvor, ki se ga da amplitudno ali frekvenčno modulirati ter bolj trpežno izvedbo akusto-optične celice. Ker pa radioamaterji nimamo ravno dosti izkušenj z modulacijo laserjev, sem se tu odločil opisati sicer delujočo, ampak še vedno samo poskusno napravo.

Že izbira snovi, v kateri pride do akusto-optičnih pojavov, ni enostavna. Fiziki običajno poskušajo z organskimi topili in akusto-optični pojav so menda prvič opazili v toluenu. Jaz sem se mojih poskusov lotil kar z navadno vodovodno vodo. Poskusil sem tudi s čistim etilnim alkoholom in dobil večje uklonske kote ter boljšo občutljivost, verjetno zaradi manjše hitrosti zvoka v alkoholu (1.1km/s). Nisem še poskusil naprimer z acetonom ali trikloretilenom, ki jih tudi imam vedno pri roki v moji delavnici, ker bi od moje plastične prozorne posode verjetno bolj malo ostalo...

Akusto-optični modulator lahko uporabljamo na različne načine. Najenostavnejši način je s potujočim zvočnim valom, kot je to prikazano na Slikah 2. in 3. Da dobimo potujoči zvočni val, je na enem koncu resda potreben izvor ultrazvoka, na drugem koncu pa je treba preostali ultrazvok zadušiti z akustičnim absorberjem. Kot zvočni absorber uporabimo tkanino iz steklene volne oziroma ploščico iz vitroplasta, ki vsebuje takšno tkanino v epoksidni smoli. Ploščico postavimo v tekočino poševno pod takšnim kotom, da preostali odbiti zvočni valovi niso več pravokotni na laserski žarek ter ne povzročajo akusto-optičnih uklonskih pojavov.

Akusto-optični modulator s potujočim zvočnim valom uporabljamo tako, da moduliramo jakost VF izvora, ki napaja piezo pretvornik. Jakost neuklonjenega žarka ($m=0$) je pri tem največja, ko je VF izvor izključen, ter upada z večanjem VF moči vse do točke, ko Besselova funkcija $J_0(v)$ doseže svojo prvo ničlo. Prenosna funkcija takšnega modulatorja sicer ni linearna, ker Besselova funkcija ni premica, omogoča pa spreminjanje jakosti neuklonjenega žarka od polne izhodne moči laserja pa vse do skoraj nič. Frekvenčna pasovna širina takšnega modulatorja zavisi od debeline laserskega žarka ter hitrosti razširjanja zvočnega valovanja, v danem primeru je to manj kot 1MHz.

Akusto-optični modulator lahko uporabljamo tudi s stojnim zvočnim valom. Namesto zvočnega absorberja namestimo odbojnik

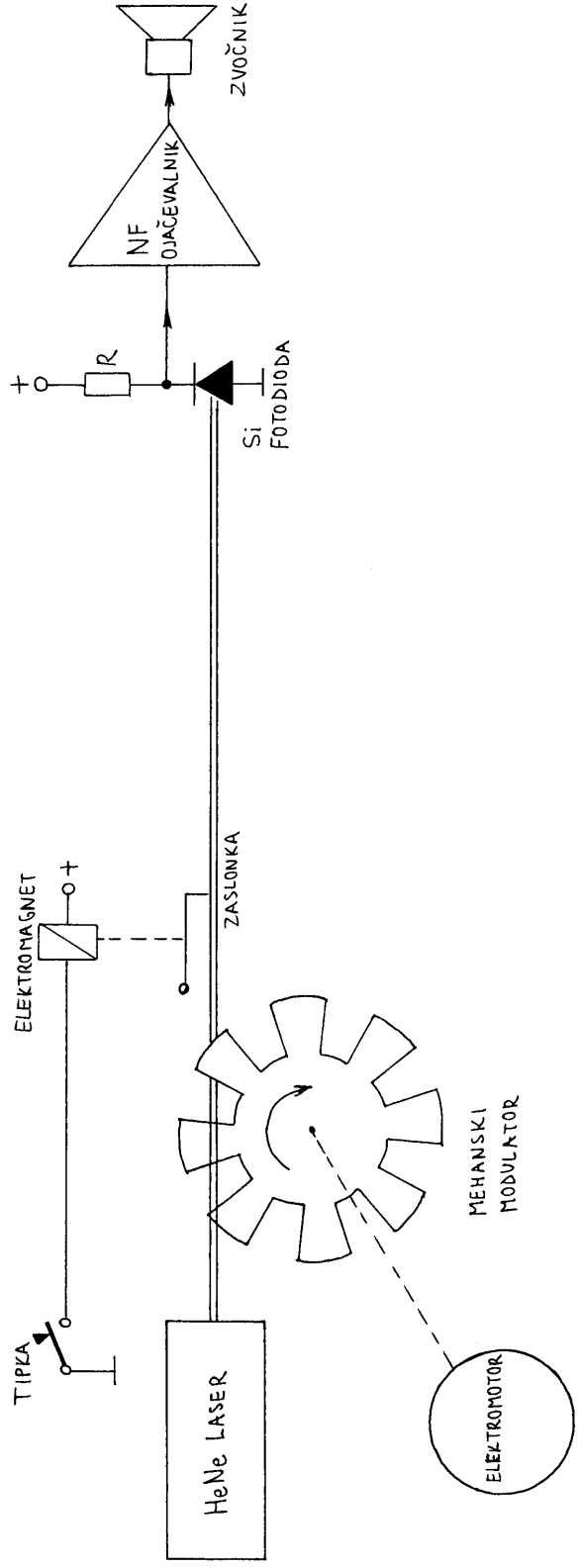
za zvočno valovanje, za kar dostikrat zadošča kar ravno dno posode s tekočino. V stojnem zvočnem valovanju zgoščine in razredčine ne potujejo, pač pa utripajo s frekvenco zvočnega valovanja. Neuklonjeni žarek ($m=0$) je v tem slučaju moduliran z dvojno frekvenco zvočnega valovanja, v našem slučaju nekje med 22 in 24MHz. V tem slučaju je smiselno frekvenčno modulirati VF izvor, da uporabimo teh 22 do 24MHz kot FM podnosilec za naše komunikacije.

Končno lahko uporabimo akusto-optično celico ne samo za modulacijo laserskega žarka, pač pa tudi za spektralno analizo visokofrekvenčnih signalov. Če namreč pripeljemo hkrati več signalov na piezo pretvornik, dobimo istočasno več uklonjenih žarkov. Če je jakost posamičnih signalov zadosti majhna, dobimo poleg neuklonjenega žarka ($m=0$) samo žarke prvega reda ($m=1$). Jakost teh žarkov tedaj točno ustreza jakosti VF signalov, uklonski kot oziroma odmik žarka pa frekvenci VF signalov.

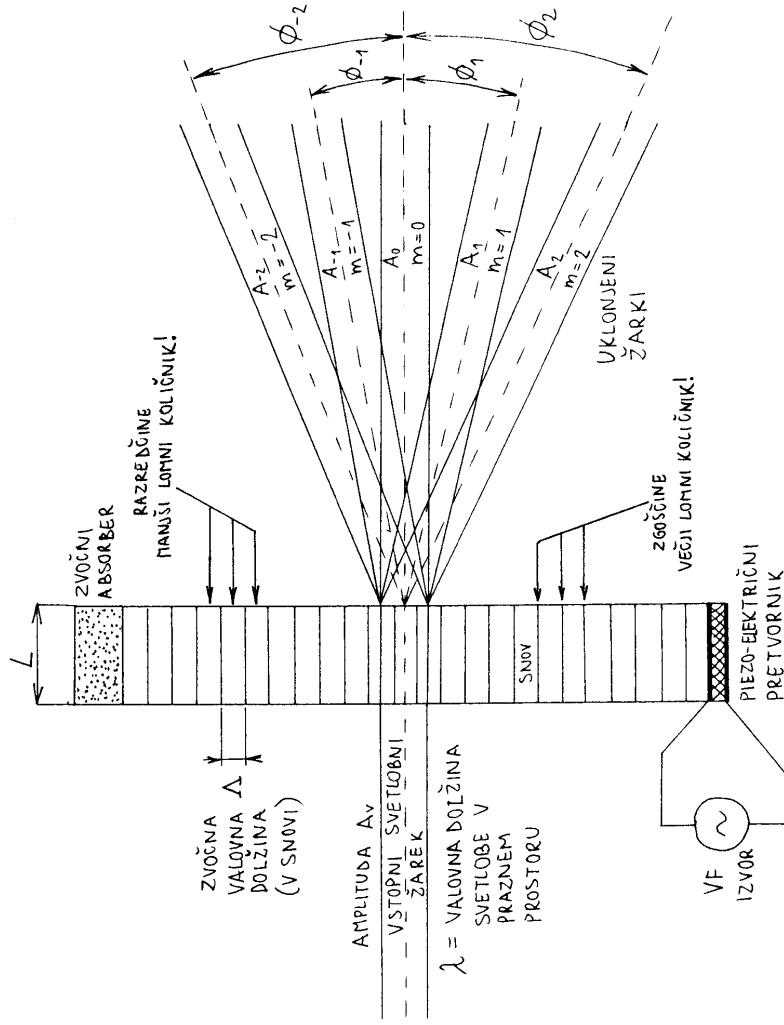
Akusto-optični visokofrekvenčni spektralni analizator žal zaostaja za bolj običajnimi elektronskimi spektralnimi analizatorji kar se tiče dinamike in frekvenčne ločljivosti. Zato se v praksi ni uveljavil kot laboratorijski inštrument, pač pa samo tam, kjer je elektronski spektralni analizator odpovedal, naprimer za detekcijo radarskih impulzov. Doma izdelan akusto-optični spektralni analizator je še dosti slabši in verjetno kot tak ni uporaben za resne meritve...

Seznam slik:

- Slika 1. - Enostavna modulacija laserskega žarka.
- Slika 2. - Raman-Nath-ov uklon svetlobe na zvočnem valovanju.
- Slika 3. - Praktična izvedba akusto-optičnega modulatorja.
- Slika 4. - Enostaven VF generator za krmiljenje piezo pretvornika.



Slika 1.- Enostavna mehanska modulacija laserskega žarka.



ODKLON ŽARKA:

$$\phi_m \approx m \cdot \frac{\lambda}{\Lambda}$$

AMPLITUDA ŽARKA:

$$A_m = A_v \cdot J_m(Nr)$$

$$Nr = k \cdot \Delta n \cdot L$$

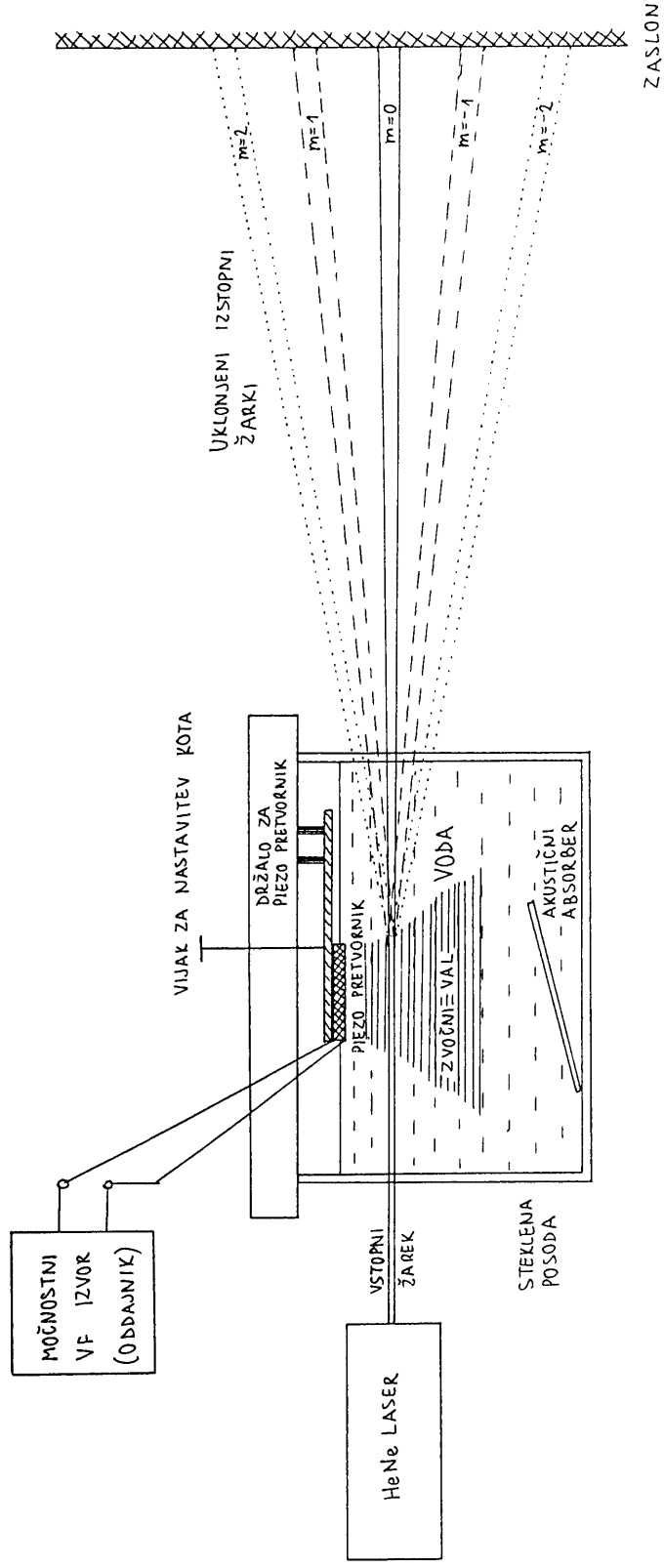
$k = \frac{2\pi}{\lambda}$ svetlobna valovna konstanta

$\Delta n = \max.$ sprememba lomnega količnika snovi

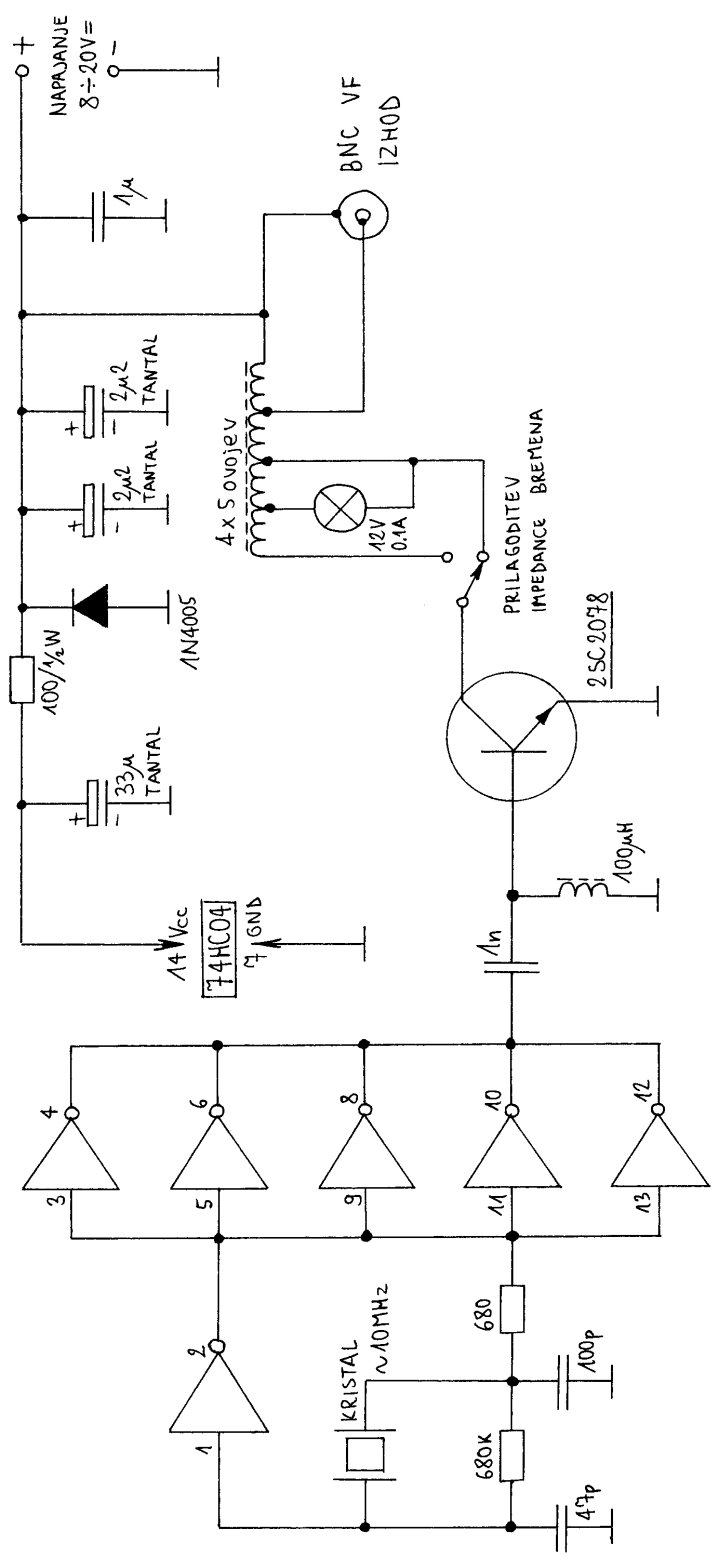
$L =$ dolžina poti po snovi

$J_m =$ Bessel-ova funkcija reda m valovanja.

Slika 2. - Raman - Nath-ov uklon svetlobe na zvočnem valovanju.



Slika 3. - Praktična izvedba akusto-optičnega modulatorja.



Slika 4. - Enostaven VF izvor za krmiljenje piezo pretvornika.