

## Akustooptický modulátor s postupnou a stojatou akustickou vlnou

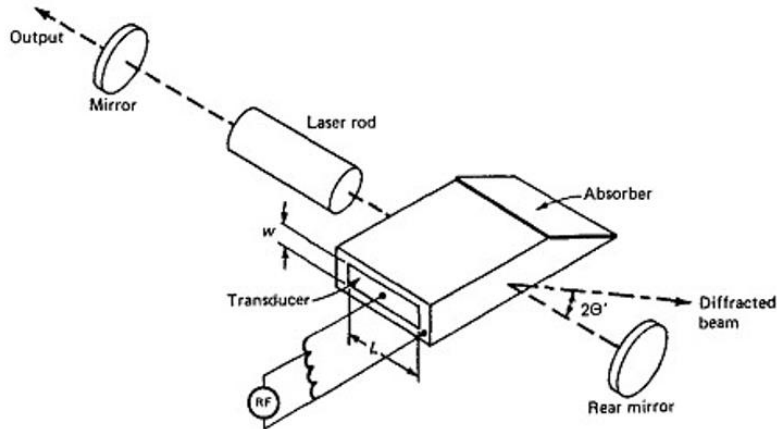
**Akustooptické modulátory (AOM)**, někdy též nazývané Braggovské cely, využívají akustooptického jevu pro vychylování nebo posunutí frekvence optického záření pomocí zvukových vln (obvykle o frekvencích  $f$  řádu desítek MHz a vlnových délkách  $\Lambda \sim 10 - 100 \mu\text{m}$ ). V laserové technice se používají pro modulaci činitele jakosti  $Q$  optického rezonátoru buď pro Q-spínání (AO Q-switch, což je nejčastěji **AOM s postupnou akustickou vlnou**) nebo synchronizaci módů (AO Mode-locker, což je nejčastěji **AOM se stojatou akustickou vlnou**). Rozdíl mezi nimi je v tom, že v AOQS je akustická vlna po jednom průchodu prostředím utlumena a neodráží se, zatímco stojaté vlny v AOML je dosaženo odrazem zvukové vlny na druhém rovnoběžném čele a interakcí mezi prot sobě se šířícími zvukovými vlnami. AOML tak představuje rezonátor pro zvukovou vlnu s **vlastními rezonančními frekvencemi vzdálenými od sebe o hodnotu:**

$$\Delta f = \frac{v_{ak}}{2L} \quad (1)$$

kde  $v_{ak}$  je rychlost ultrazvukové vlny v prostředí modulátoru a  $L$  je příčný rozměr modulátoru. V telekomunikacích se AOM používají jako amplitudové modulátory, ve spektroskopii pro řízení frekvence záření. AOM se skládá z **piezoelektrického měniče** spojeného s vlastním transparentním optickým materiálem modulátoru, jako je sklo či křemen. Vysokofrekvenční elektrický signál způsobuje vibrace měniče, které budí v materiálu modulátoru zvukovou vlnu. Tu si lze představit jako pohybující se oblasti stlačení a roztážení materiálu. Skrz fotoelastický efekt, který spojuje mechanické napětí a index lomu materiálu, zvukové vlny vytvářejí periodickou modulaci indexu lomu a materiál se tak chová jako optická fázová mřížka. Vzniklá fázová mřížka má periodu rovnou vlnové délce akustické vlny  $\Lambda$  a amplitudu úměrnou zvukové amplitudě.

Dopadající optická vlna je na vzniklé mřížce rozptylována podobně jako v případě Brillouinovského rozptylu a výsledný difrakční jev je podobný Braggovské difrakci.

Pokud na mřížku dopadá optický svazek, část jeho intenzity bude difraktována ven ze svazku do jednoho či více diskretních směrů. Vhodným zvolením parametrů může být difraktovaný svazek vychýlen ven z dutiny laserového rezonátoru a tím způsobit ztrátu energie, která je dostatečná k účinnému snížení činitele jakosti rezonátoru  $Q$  pro Q-spínání. Při vypnutí řídicího napětí do měniče se laserový rezonátor vrací do stavu s vysokým činitelem jakosti  $Q$ . Bez šířící se ultrazvukové vlny uvnitř, má kvádr z taveného oxidu křemičitého opět vysokou optickou propustnost a dojde k vyzáření Q-spínaného impulsu.



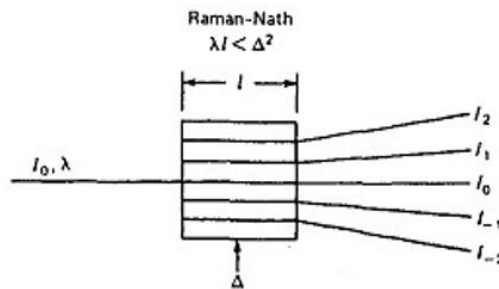
Obrázek 1: Akustooptický Q-spínač použitý v kontinuálně čerpaném Nd:YAG laseru. Hlavní součásti Q-spínače jsou velmi tenký měnič z křemenného krystalu o poloviční tloušťce akustické vlnové délky, blok z taveného oxidu křemičitého, ke kterému je měnič připojen epoxidem, indukční síť přizpůsobená impedanci, akustický absorbér na opačné straně k převodníku, vodou chlazený plášťový systém pro odvádění generovaného tepla, synchronizační spínač, který automaticky vypne vysokofrekvenční napájení, pokud teplota v modulátoru stoupne nad povolené limity, náklon pro nastavení Braggova úhlu, 50 MHz vysokofrekvenční měnič obsahující impulsní generátor a logika, která umožňuje nastavení opakovací frekvence od 0 do 50 kHz.

Je možné pozorovat dva rozdílné difrakční efekty v závislosti na optické a akustické vlnové délce  $\lambda$  a  $\Lambda$ , a vzdálenosti  $L$  přes kterou světlo interaguje s akustickým svazkem. Jedná se buď o tzv. Raman-Nathův či Braggův rozptyl, podle toho, zda je splněna podmínka (2) nebo (6).

**Difrakční jev při Raman Nathově rozptylu** má charakter násobných difrakčních maxim symetrických vzhledem k nultému maximu. Nastává, když je buď interakční cesta  $L$  velmi krátká, nebo když je ultrazvuková frekvence  $f = 1/\Lambda$  velmi nízká:

$$L\lambda \ll \Lambda^2 \quad (2)$$

Maximální rozptyl světla je pozorován, pokud jsou světelný paprsek a ultrazvuková vlna navzájem kolmé.

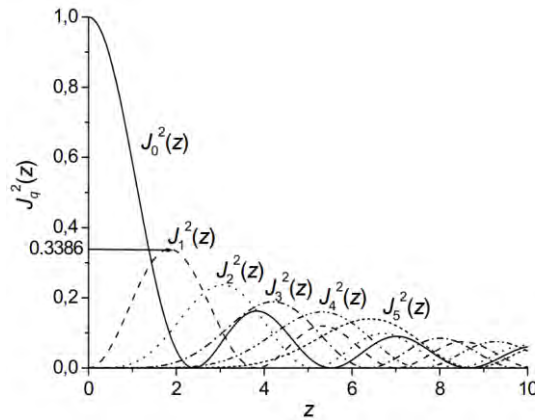


Obrázek 2: Difrakce v případě Raman-Nathova režimu.

Intenzita jednotlivých maxim je dána vztahem

$$\frac{I_n}{I_0} = J_n^2(\Delta\phi) \quad (3)$$

kde  $I_n$  je intenzita  $n$ -tého řádu,  $I_0$  je intenzita dopadajícího světla,  $J_n$  je Besselova funkce  $n$ -tého řádu a  $\Delta\phi = \pi\Delta nL/\lambda$  je amplituda fázové mřížky. Výhodou tohoto režimu může být možnost vynulování nultého difrakčního řádu.



Obrázek 3: Průběh Besselových funkcí  $J_n^2(z)$ .

Dá se dokázat, že amplituda  $\Delta\phi$  je

$$\Delta\phi = \pi \left( \frac{2}{\lambda_0^2} \frac{l}{w} M_2 P_{ac} \right)^{1/2} \quad (4)$$

kde  $\lambda_0$  je optická vlnová délka,  $P_{ac}$  je akustický výkon,  $l$  a  $w$  jsou rozměry plochého obdélníkového měniče a  $M_2$  zahrnuje skupinu materiálových parametrů známých jako činitel akustooptické kvality materiálu:

$$M_2 = \frac{n^6 p^2}{\rho v^3} \quad (5)$$

kde  $n$  je index lomu,  $p$  je příslušný fotoelastický koeficient,  $\rho$  je hustota a  $v$  je akustická rychlost. Čím bude mít materiál větší index lomu  $n$  a fotoelastický koeficient  $p$  tím je lepší pro využití v akusto-optických aplikacích. Takové materiály mají mimo velké hustoty  $\rho$  často i další nevýhody, a proto vhodných materiálu tedy není mnoho.

V **Braggově režimu** jsou difrakční maxima vyšších řádů eliminována a většina energie je soustředěna v pouze v nultém a prvním řádu. Tento režim nastává, když se frekvence ultrazvukové vlny zvýší a cesta interakce se prodlouží a tedy platí:

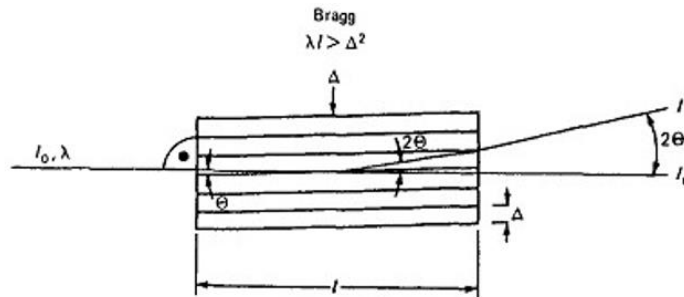
$$L\lambda \gg \Lambda^2 \quad (6)$$

Prakticky se tak děje pro  $L\lambda \geq 10 \Lambda^2$ . V Braggově režimu jsou optické a ultrazvukové paprsky mírně posunuty od kolmého dopadu, aby interagovaly pod Braggovým úhlem  $\theta$  v prostředí modulátoru:

$$\sin \theta = \frac{\lambda}{2\Lambda} \quad (7)$$

Nastavení Braggovského režimu je velmi citlivé na nastavení úhlu ( $\sim$  minuty). Při rozladění účinnost velmi rychle klesá. Při interakci je tedy podstatný poměr mezi **vlnovou délkou optické vlny  $\lambda$  a vlnovou délkou akustické vlny  $\Lambda$  v prostředí modulátoru o indexu lomu  $n$** . Tzn.  $\lambda = \lambda_0/n$ , kde  $\lambda_0$  je optická vlnová délka ve vakuu. Externě měřený úhel  $\theta'$  mezi dopadajícím světlem  $I_0$  a akustickou vlnou je  $\theta' = n\theta$  a úhel rozptylu je dvojnásobný:

$$2\theta' = 2n\theta \approx \frac{\lambda_0}{2\Lambda} \quad (8)$$



Obrázek 4: Difrakce v případě Braggova režimu.

Intenzita rozptýlená do prvního difrakčního řádu  $I_1$  je

$$\frac{I_1}{I_0} = \sin^2 \left( \frac{\Delta\phi}{2} \right) \quad (9)$$

**Hloubkou modulace** nazýváme procentuální pokles energie v nultém maximu oproti případu bez modulace. Dosahuje hodnoty cca 1 % na 1 W budícího elektrického výkonu pro AOQS a hodnoty několikrát vyšší pro AOML. Z rovnic (3) – (9) je zřejmé, že velikost difraktovaného výkonu závisí na materiálových parametrech vyjádřených  $M_2$ , poměru délky k šířce interakční dráhy a akustického výkonu  $P_{ac}$ . V daném materiálu jako je např. tavený oxid křemičitý je hodnota fotoelastického koeficientu  $p$  v (5) závislá na rovině polarizace světelného paprsku vzhledem ke směru šíření ultrazvukové vlny a také na jejím typu, tzn. podélná nebo příčná vlna. Typická účinnost akustooptických prvků pracujících v Braggově režimu bývá 70–90 %, vyšší spíše jen výjimečně, jelikož pro 100% účinnost je nutný 2,5krát větší výkon než pro 70% účinnost.

Při generování příčné vlny je pohyb částice kolmý ke směru šíření akustické vlny. V tomto případě je dynamická optická ztráta nezávislá na polarizaci v izotropních materiálech, jako je tavený křemen. Tabulka 1 uvádí příslušné materiálové parametry pro akustooptický Q-spínač vyrobený z taveného oxidu křemičitého. Protože při malé hloubce modulace lze funkci sinus v (8) považovat za rovnou jejímu argumentu, je difraktovaný výkon úměrný hodnotě  $M_2$ .

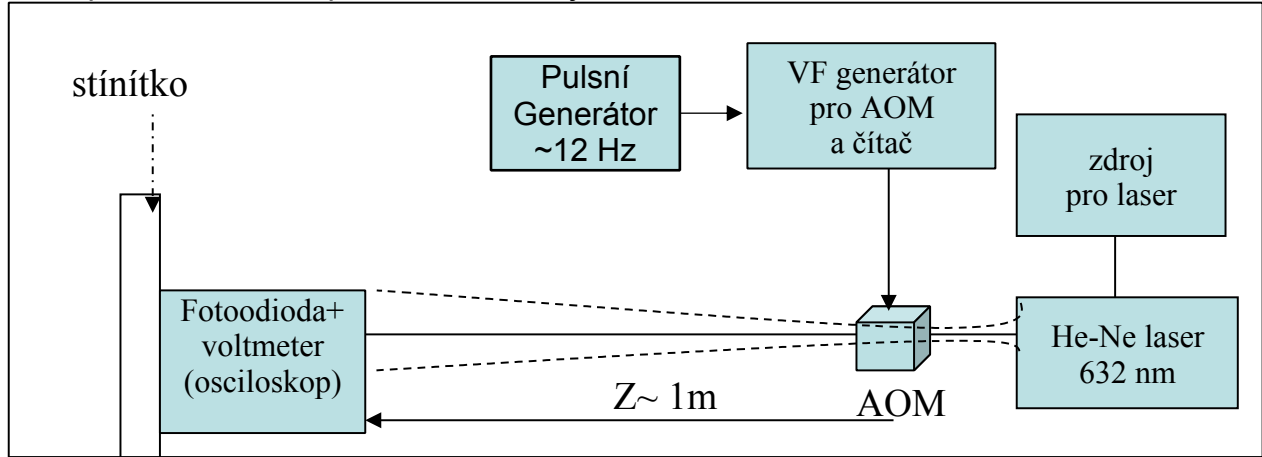
Z tabulky 1 vyplývá, že v Braggově cele využívající ultrazvuk v podélném módu, je světlo polarizované kolmo na vektor akustické vlny vychylováno pětikrát silněji než světlo polarizované rovnoběžně s tímto směrem. Zařízení využívající příčných vln, které pracuje nezávisle na polarizaci světla, má vyšší difrakční účinnost než paralelně polarizované světlo v zařízení s podélnou vlnou, ale podstatně nižší účinnost ve srovnání s kolmo polarizovaným světlem v podélném modulátoru.

Tabulka 1: Materiálové parametry akustooptických Q-spínačů využívajících tavený oxid křemičitý.

Akustická vlna	Elastooptický koeficient $p$	Polarizace optického svazku vzhledem k akustické vlně	Rychlost zvuku $\times 10^5 [cm/s]$	Činitel akustooptické kvality materiálu $M_2$ $\times 10^{-18} [s^3/g]$	Akustický výkon pro 1% odchýlení ( $l/w = 10$ ) [W]
Příčná vlna	$p_{44} = 0.075$	Nezávislá	3.76	0.47	0.42
Podélná vlna	$p_{11} = 0.121$	Paralelní	5.95	0.30	0.67
Podélná vlna	$p_{12} = 0.270$	Kolmá	5.95	1.51	0.13

**Předmětem dané úlohy** je měření nejdůležitějších parametrů akustooptického modulátoru s postupnou vlnou AOQS a akustooptického modulátoru se stojatou vlnou AOML.

Principiální schéma uspořádání měření je na obr. 5.



Obrázek 5: Principiální schéma uspořádání měření. Vzdálenost AOM od laseru je asi 20 cm, vzdálenost AOM od stínítka cca 1 m.

**Princip měření difrakce a hloubky modulace AOM:** Pro měření používáme jako zdroje He-Ne laseru, difrakční jev pozorujeme na stínítku ve vzdálenosti cca 1 m. Hloubku modulace měříme pomocí fotodiody a voltmetru (osciloskopu).

#### Použité AOM a generátory:

- Q-spínač AOQS s vf generátorem 45 MHz, min. výkon 5 W, max. výkon 20 W.
- Mode-locker AOML s vf generátorem 74.630 – 74.990 MHz, max. výkon 5 W.

#### Postup:

#### Domácí příprava:

- Uvažujte akustooptický modulátor z taveného křemene o interakční délce  $L = 40 \text{ mm}$  a indexu lomu  $n = 1.46$ . Rychlost šíření ultrazvuku v křemenu uvažujte  $v_{ak} = 6 \text{ km/s}$ . Spočtěte vlnovou délku zvukové vlny  $\Lambda$  pro budící frekvence 45 MHz a 75 MHz.
- Spočtěte součin  $L \cdot \lambda$  a porovnejte ho s kvadrátem akustické vlnové délky  $\Lambda^2$  pro obě budící frekvence. Určete, zda je splněna podmínka pro Raman-Nathovu (2) nebo Braggovu difrakci (6).
- Pro případ AOML stanovte frekvenční vzdálenost dvou rezonančních frekvencí podle vzorce (1). Uvažujte tloušťku modulátoru  $L = 1 \text{ cm}$ .
- Spočtěte pro obě budící frekvence Braggův úhel (ve stupních a minutách) v prostředí modulátoru o indexu lomu  $n$  a úhlovou odchylku prvního difrakčního maxima vně modulátoru. Použijte vztahy (7) a (8).

## Měření parametrů modulátorů

5. Modulátor AOQS provozujte pouze **kvazikontinuálně** s použitím pulsního generátoru tak, aby doba zapnutí nepřekročila 5 s. Trvalé zapnutí by při absenci vodního chlazení vedlo ke zničení modulátoru. Nastavte modulátor AOQS tak, aby byl na stínítku vidět difrakční obrazec s maximální intenzitou. Zznamenejte jeho tvar např. pomocí fotoaparátu v mobilu, či nakreslete.
6. Změřte úhlovou vzdálenost difrakčních maxim od nultého maxima.
7. Změřte hloubku modulace (procentuální část výkonu difraktovaného z nultého maxima) pro minimální a maximální budící výkon v generátoru 45 MHz (v případě AOML stačí pouze pro maximální výkon).
8. Změřte kolik procent výkonu je obsaženo v jednotlivých maximech vyšších řádů.

### 9.-12. Opakujte měření 5-8 s modulátorem AOML a generátorem 75 MHz.

13. Změnou budící frekvence v generátoru v rozmezí 74.630 – 74.990 MHz, frekvenční interval  $\Delta f$  dvou sousedních frekvenčních maxim difrakce (na pár sekund odpojte pulsní generátor a odečtěte hodnotu frekvence na čítači, poté ihned opět pulsní generátor připojte) a porovnejte s vypočtenou hodnotou z bodu 3.
14. Proměřte detailní tvar (alespoň 10 bodů) a určete šířku na polovině maxima jednoho frekvenčního píku  $\Delta f_{FWHM}$ . Z naměřených hodnot vypočtěte finesu  $\mathcal{F} = \Delta f / \Delta f_{FWHM}$  akustického rezonátoru AOML. Stanovte, jaká musí být frekvenční stabilita budícího generátoru.

### Požadované výsledky uvedené v protokolu:

1. Výsledky domácí přípravy.
2. Schéma uspořádání měření.
3. Obrázky průběhu difrakčního jevu pro oba modulátory.
4. Tabulka naměřených a vypočtených hodnot parametrů úhlových vzdáleností sousedních difrakčních maxim pro oba modulátory.
5. Spočtené hodnoty hloubky modulace (%) a difrakční účinnosti (%/W) obou modulátorů (u AOQS pro dvě hodnoty – minimální a maximální, pro AOML jen maximální) budícího výkonu.
6. Graf závislosti hloubky modulace AOML na budící frekvenci v rozsahu 100 kHz kolem maxima.

### Literatura:

W. Koechner: *Solid State laser Engineering*

M. Vrbová: *Lasery a moderní optika*

B.E.A. Saleh, M.C. Teich: *Základy fotoniky, sv. 4*