

Laser je přístroj, který generuje elektromagnetické záření

- monochromatické,
- směřované (s malou rozbíhavostí),
- koherentní,
- vysoce energetické,
- výkonné,
- s velkým jasem.

Základní konstrukční součásti pevnolátkového laseru

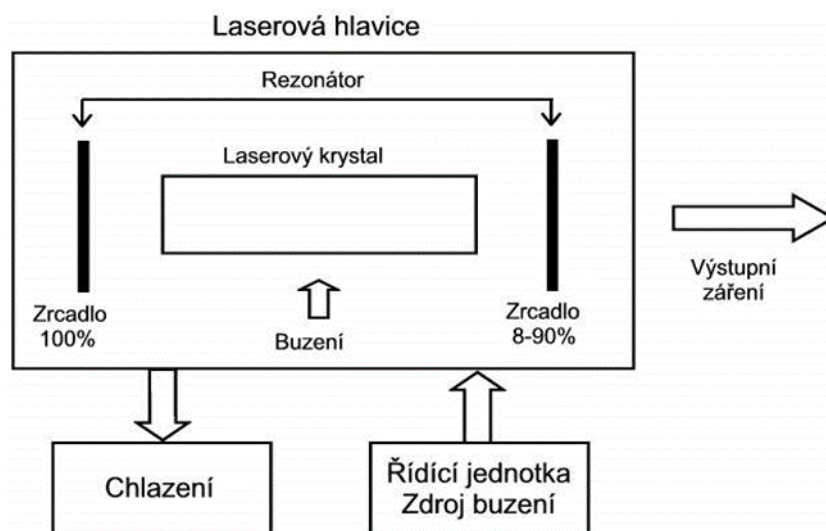
laserová hlavice (aktivní prostředí, budící elementy + budící dutina, otevřený rezonátor), chlazení, zdrojová jednotka

Buzení pevnolátkových laserů – především optické buzení

Nekoherentní – výbojky

Koherentní – laserové diody, lasery, vláknové lasery

Otevřený rezonátor - soustava dvou nebo více odrazných ploch nebo optických prvků, ve které může být vybuzeno stojaté vlnění s vlnovou délkou zpravidla podstatně menší, než jsou geometrické rozměry těchto ploch a vzdálenost mezi nimi.



Úkolem **zdrojové jednotky** je dodat dostatečné množství energie k buzení (VN zdroj pro výbojku, zdroj pro laserovou diodu)

Dvě základní komponenty aktivního prostředí pevnolátkových laserů

matrice a aktivátor

Matrice - vlastnostmi matrice jsou převážně určeny základní technické vlastnosti aktivního prostředí

Aktivátory jsou atomy nebo ionty umístěné v matrici zúčastňující se přímo procesu generace laserového záření.

(**senzibilizátor** – zlepšuje přenos čerpací energie k aktivnímu iontu – Cr, Tm)

Rubínový laser - $\text{Cr}^{3+}:\text{Al}_2\text{O}_3$, $\lambda = 694 \text{ nm}$

Yb:YAG laser - $\text{Yb}^{3+}:\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$, $\lambda = 1029 \text{ nm}$

Nd:YAG laser - $\text{Nd}^{3+}:\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$, $\lambda = 1064 \text{ nm}$

Er:YAG laser - $\text{Er}^{3+}:\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$, $\lambda = 2940 \text{ nm}$

Nd:YLF laser - $\text{Nd}:\text{LiYF}_4$, $\lambda = 1053 \text{ nm}$

Ti:safír laser - $\text{Ti}:\text{Al}_2\text{O}_3$, $\lambda = 660 - 1010 \text{ nm}$

Příklad 9.1. Diferenciální účinnost (Slope efficiency) v Ti:Al₂O₃ laseru.

Ti:Al₂O₃ laser je podélně buzený fokuzovaným svazkem Ar⁺ laseru s vlnovou délkou $\lambda_p = 514$ nm. Do dutiny je umístěn filtr, umožňující a podporující laserovou generaci na vlnové délce $\lambda = 850$ nm. Předpokládáme logaritmické ztráty na jeden oběh rezonátorem $\gamma_{rt} = 10\%$, reflexivitu výstupního zrcadla $R = 95\%$ a účinnost buzení $\eta_p = 30\%$. Předpokládáme optimální budící podmínky. Vypočítejte slope-efficiency (diferenciální účinnost) generace laseru.

Řešení:

Parametr slope-efficiency (diferenciální účinnost) generace laseru pro 4-hladinový systém lze zapsat:

$$\eta_s = \eta_p \left(\frac{\gamma_2}{2\gamma} \right) \left(\frac{h\nu}{h\nu_p} \right) \left(\frac{A_b}{A} \right) \quad (1)$$

kde je:

γ jsou logaritmické ztráty na jeden průchod rezonátorem, tedy $2\gamma = \gamma_{rt} = 0.1$

γ_2 jsou logaritmické ztráty výstupního zrcadla (činné ztráty)

$$\gamma_2 = -\ln(1 - T_2) = -\ln(R_2) = 0.05$$

A je průřez (obsah průřezu) aktivního prostředí

A_b je průřez (obsah průřezu) laserového módu

Při optimálních budících podmínkách platí: $A = A_b$

Po dosazení vypočítaných hodnot do vztahu (1) dostaneme:

$$\eta_s = \eta_p \left(\frac{\gamma_2}{2\gamma} \right) \left(\frac{h\nu}{h\nu_p} \right) \left(\frac{A_b}{A} \right) = 0.30 \left(\frac{0.05}{0.10} \right) \left(\frac{514}{850} \right) 1 = 0.09$$

Závěr:

Slope-efficiency (diferenciální účinnost) generace laseru za uvedených podmínek je 9%.

Příklad 9.2. Výstupní výkon z Nd:YAG laseru.

Nd:YAG laser je příčně koherentně buzen zářením s vlnovou délkou 808 nm. Laserový mód má průměr stopy $w_0 = 1.4$ mm. Účinný průřez pro stimulovanou emisi je $\sigma = 2.8 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$. Doby života pro horní laserovou hladinu je $\tau = 230 \text{ } \mu\text{s}$. Předpokládáme, že výstupní zrcadlo má transmitanci $T = 12\%$ a prahový výkon budícího záření je $P_{th} = 48.8 \text{ W}$. Vypočítejte výkon budícího záření, který je požadován pro dosažení výkonu výstupního záření z laseru $P_{out} = 45 \text{ W}$.

Řešení:

Nd:YAG aktivní prostředí lze modelovat 4-hladinovým systémem kvantových hladin. Výstupní výkon z laseru lze spočítat podle vztahu:

$$P_{out} = (A_b I_s) \left(\frac{\gamma_2}{2} \right) \left(\frac{P_p}{P_{th}} - 1 \right) \quad (2)$$

kde je:

A_b průřez (obsah průřezu) laserového módu

γ_2 logaritmické ztráty výstupního zrcadla (činné ztráty) $\gamma_2 = -\ln(1 - T_2)$

P_p výkon budícího záření

P_{th} prahový výkon

$I_s = hv / \sigma \tau$ saturační intenzita pro 4-hladinový systém

Vyjádříme výstupní výkon záření laseru podle uvedeného vztahu (2).

$$\gamma_2 = -\ln(1 - T_2) = -\ln(1 - 0.12) = 0.128$$

$$I_s = \frac{hv}{\sigma \tau} = \frac{hc}{\lambda \sigma \tau} = \frac{6,626 \times 10^{-34} \cdot 3 \times 10^8}{1064 \times 10^{-9} \cdot 2,8 \times 10^{-23} \cdot 230 \times 10^{-6}} = 2,9 \times 10^7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

$$A_b = \pi w_0^2 = 3,14 \cdot (0,0014)^2 = 6,15 \times 10^{-6} \text{ m}^2$$

$$P_{out} = (A_b I_s) \left(\frac{\gamma_2}{2} \right) \left(\frac{P_p}{P_{th}} - 1 \right) = 178,4 \cdot 0,064 \cdot \left(\frac{P_p}{48,8} - 1 \right) = 0,233 (P_p - P_{th})$$

Závěr:

Pro $P_{out} = 45 \text{ W}$ musí být tedy výkon budícího záření:

$$P_p = \frac{P_{out}}{0,233} + P_{th} = \frac{45}{0,233} + 48,8 = 242 \text{ W} .$$

Poznámka: doba života kvantové soustavy na dolní laserové hladině v Nd:YAG laseru je asi $\tau_1 = 30 \text{ ns}$, což je hodnota velmi malá ve srovnání s dobou života pro horní laserovou hladinu $\tau_2 = 230 \text{ } \mu\text{s}$, proto pro výpočet saturační intenzity jsme použili přiblížení: $\tau = \tau_1 + \tau_2 \approx \tau_2$.

Příklad 9.3. Buzení impulsního laseru pomocí výbojky.

Pro čerpání impulsního pevnolátkového laseru slouží obvod laserového zdroje, skládající se z kondenzátoru o kapacitě C , který se přes tlumivku o indukčnosti L vybíjí do výbojky. Impulsní výbojka je uzavřená trubice o průměru d vyrobená z transparentního materiálu (pro emitované záření) naplněná plynem (nejčastěji xenonem) na určitý tlak p , na jejíchž koncích jsou elektrody vzdálené od sebe o l .

Důležitým parametrem impulsní výbojky je explozní energie výbojky, což je energie, při které dojde k destrukci výbojky:

$$E_{ex} = k.l.d.(\tau_p)^{1/2}$$

(E – jednotka (J), k – konstanta závisící na typu a tlaku plynu a na fyzikálních a tepelných vlastnostech materiálu výbojky, l – jednotka (cm), d – jednotka (cm), τ_p – doba trvání optického impulsu výbojky – jednotka (s))

Pro životnost impulsní výbojky - počet záblesků n - za který se sníží optická energie vyzařovaná výbojkou na 50% počáteční hodnoty, platí empirický vztah:

$$n = \left(\frac{E_{ex}}{E_0} \right)^{8.5}$$

Řešení:

Pro křemennou výbojku plněnou xenonem na tlak 60 kPa, $d = 0.5$ cm, $l = 10$ cm, $\tau_p = 200 \times 10^{-6}$ s, $k = 1.2 \times 10^4$ (pro xenon) platí:

$$E_{ex} = k.l.d.\tau_p^{1/2} = (1.2 \times 10^4) \cdot 10 \cdot 0,5 \cdot 14 \times 10^{-3} = 840 \text{ J}$$

Závěr:

Pokud energie budícího optického pulsu výbojky je typicky $E_0 = 100$ J, bude životnost výbojky (počet vyzářených impulsů výbojky do poklesu energie impulsu na 50% počáteční hodnoty):

$$n = \left(\frac{E_{ex}}{E_0} \right)^{8.5} = \left(\frac{840}{100} \right)^{8.5} \approx 10^5$$

Příklad 9.4. Práh destrukce laserového krystalu

Práh destrukce rubínového krystalu je roven $20 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$. Může být krystal s průměrem 0.5 cm a délkou 7 cm zničen vlastním zářením, jestliže je koncentrace aktivních částic rovna $1.6 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$? Najděte maximální přípustnou délku tohoto krystalu, kdy se ještě nezničí vlastním zářením.

Řešení:

Rubínový laser (vlnová délka $694,3 \text{ nm}$) lze popisovat tříhladinovým modelem.

Průřez rubínového krystalu je: $S = \pi r^2 = 3,14(0,25)^2 = 0,19625 \text{ cm}^2$.

Objem rubínového krystalu je: $V = \pi r^2 l = 3,14 \cdot (0,25)^2 \cdot 7 = 1,37375 \text{ cm}^3$.

Energie jednoho fotonu je: $E_0 = h\nu = h \frac{c}{\lambda} = 6,626 \times 10^{-34} \frac{3 \times 10^8}{694,3 \times 10^{-9}} = 2,86 \times 10^{-19} \text{ J}$.

Maximální energie, která může dopadat na čelo rubínového krystalu, aniž by se zničil: $E = \phi \cdot S = 20 \cdot 0,19625 = 3,925 \text{ J}$.

Počet fotonů dodávající tuto energii (na prahu poškození krystalu):

$$n = \frac{E}{E_0} = \frac{3,925}{2,86 \times 10^{-19}} = 1,37 \times 10^{19}.$$

V celém objemu krystalu je při koncentraci aktivních částic $1.6 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ celkem aktivních částic: $n_0 = 1,6 \times 10^{19} \cdot 1,37375 = 2,198 \times 10^{19}$. Z toho plyne, že krystal se teoreticky může zničit vlastním zářením.

Maximální přípustná délka se spočítá z počtu fotonů dodávající energii na prahu poškození krystalu a z koncentrace aktivních částic: $1,37 \times 10^{19} = 1,6 \times 10^{19} \cdot V$. Z toho délka krystalu je $4,3 \text{ cm}$.

Příklad 9.5. Výkon výbojky

Odhadněte, jaký výkon musí mít výbojka, aby bylo dosaženo prahu generace v kontinuálním režimu u Nd:sklo laseru. Doba života na honí laserové hladině je $0,5 \text{ ms}$, prahová hustota inverze populace je 10^{16} cm^{-3} , objem krystalu je 10 cm^3 . Účinnost přeměny elektrické energie lampy v energii pohlcovanou absorpčním spektrem iontů Nd^{3+} v matrici skla je 4% .

Řešení:

Nd:sklo aktivní prostředí je možno modelovat čtyřhladinovým systémem.

Protože objem krystalu je 10 cm^3 , je potřeba buzením převést $n = 10^{17}$ aktivních iontů na horní laserovou hladinu. Energie jednoho fotonu je:

$$E_0 = h\nu = h \frac{c}{\lambda} = 6,626 \times 10^{-34} \frac{3 \times 10^8}{1053 \times 10^{-9}} = 1,89 \times 10^{-19} \text{ J}$$

Je tedy buzením potřeba dodat přibližně (není zde započítán vliv energetického rozdílu mezi budícím pásem a horní laserovou hladinou, resp. dolní laserovou hladinou a základní hladinou) energii: $E = E_0 \cdot n = 1,89 \times 10^{-19} \cdot 10^{17} = 0,0189 \text{ J}$.

Aby byla tato dodaná energie účinně využita, musí být dodána během doby života kvantové soustavy na horní hladině, tedy: $P = \frac{E}{\tau} = \frac{0,0189}{0,5 \times 10^{-3}} = 37,8 \text{ W}$.

Protože účinnost převodu elektrické energie na účinně absorbovanou optickou energii výbojky je pouze 4% , musel by být výkon do výbojky (elektrický) být roven:

$$P_0 = \frac{P}{\eta} = \frac{37,8}{0,04} = 954 \text{ W}.$$