

6.3.3 Laser

Předpoklady: 060302, 060209

LASER (Light amplification by the stimulated emission of radiation)

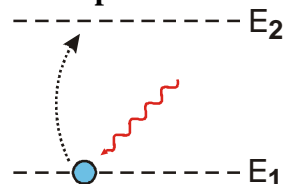
Zdroj světla mimořádných vlastností:

- **vysoká monochromaticita:** laser září na jediné frekvenci, poměr $\Delta\lambda : \lambda$ je až $1:10^{15}$, ($\Delta\lambda$ označuje rozdíl největší a nejmenší vyzařované vlnové délky), monochromatické plynové zářivky mají maximálně $1:10^6$,
- **vysoká koherence:** koherenční délky (délky, o které se mohou lišit dva paprsky, které spolu ještě budou interferovat, více v hodině 050302) je u laserů od jednotek cm po jednotky m (u speciálních konstrukcí i více), u běžného světla jde o jednotky mikrometrů,
- **vysoká směrovost:** laserový paprsek velmi rovnoběžný a málo rozbíhavý, stopa laserového pulsu pro měření vzdálenosti Země-Měsíc má na Měsíci přibližně dvoumetrový průměr,
- **vysoká zaostřitelnost:** zaostřením do malé stopy zvyšujeme intenzitu paprsku (u laserů až na 10^{17} W/cm^2 , svařovací plamen má 10^3 W/cm^2)
- **vysoká časová říditelnost:** laserové impulsy můžeme zkrátit až na jednotky pikosekund 10^{-12} s (vyzáření 1 J energie v takto dlouhém pulsu znamená výkon 1 TW - řádově výkon všech elektráren na Zemi).

Princip laseru

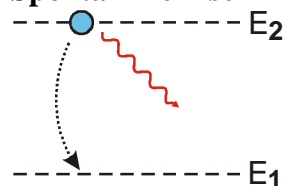
Světlo vzniká při přechodu atomu z jednoho stavu do druhého. Tři možné děje:

Absorpce



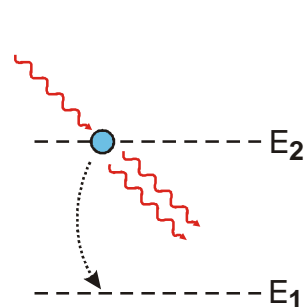
Na atom dopadne foton o energii $E = hf \Rightarrow$ atom přejde ze stavu E_1 o nižší energii do (excitovaného) stavu E_2 s vyšší energií. Platí: $E_2 - E_1 = hf$.

Spontánní emise



Atom ve excitovaném stavu E_2 má tendenci samovolně přejít do stavu s nižší energií E_1 a vyzařit foton o energii $E = hf = E_2 - E_1$. Ke spontánní emisi dochází řádově za 10^{-8} s , ve výjimečných případech (u takzvaných metastabilních stavů) může být až 10^{-3} s .

Stimulovaná emise



S atomem v excitovaném stavu E_2 (ze kterého by však atom brzy sám přešel spontánní emisí do stavu E_1) interaguje foton o energii $E = hf = E_2 - E_1$. Foton patří mezi bosony \Rightarrow přítomnost bosonu zvyšuje pravděpodobnost, že se ve stejném stavu objeví i další boson \Rightarrow atom ihned přechází do stavu E_1 a vyzařuje foton ve stejném stavu jako foton, který emisi vyvolal (nejen stejná energie $E = hf = E_2 - E_1$, ale i stejný směr, polarizace, fáze nebo směr šíření).

Laserové světlo je světlo vzniklé stimulovanou emisí.

Př. 1: Jaké podmínky musíme splnit, aby mohlo dojít ke stimulované emisi a tedy vzniku laserového světla?

Musíme mít dostatek fotonů, které mohou emisi vyvolávat.

Foton musí s větší pravděpodobností potkat atom ve stavu E_2 (aby vznikl další foton), než atom ve stavu E_1 (naš foton by zanikl při absorpci) \Rightarrow musíme mít více atomů ve stavu E_2 než ve stavu E_1 .

Dostatek fotonů zajistíme tím, že aktivní látku umístíme mezi dvě rovnoběžná zrcadla, která většinu vzniklého světla odráží zpět (tím se zároveň utlumí i světlo, které není na zrcadla kolmé).



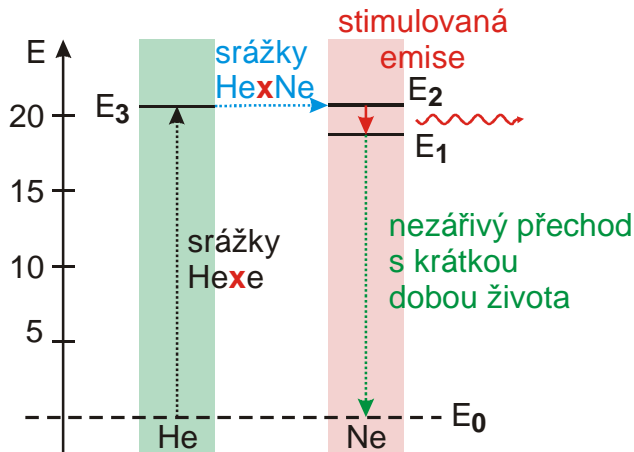
Zajistit větší obsazení stavu E_2 než stavu E_1 (**populační inverzi**) je těžší.

Zahřátí nestačí (energie potřebná k vyzáření viditelného světla je řádově eV, vyžadovala by zahřátí na desetitisíce K) \Rightarrow různá řešení závislá na konkrétní použité látce.

Helium-neonový laser

Trubice naplněná směsí helia a neonu (20:80).

Napětí mezi elektrodami způsobuje proud elektronů, které narážejí do atomů helia a excitují je ze stavu E_0 do metastabilního stavu E_3 (20,61 eV). Excitované atomy helia se mohou srazit s atomy neonu, předat jim svou energii a tak je převést ze stavu E_0 do metastabilního stavu E_2 (20,66 eV). Excitované atomy neonu přecházejí stimulovanou emisí fotonů o vlnové délce 632,8 nm do stavu E_1 a z něj spontánně rychle do stavu E_0 .



Populační inverzi hladin E_2 a E_1 u neonových atomů zajišťují dva děje:

- neustále dodávání energie od atomů helia atomům neonu (zaplňování hladiny E_2),
- samovolný přechod atomů neonu ze stavu E_1 o stavu E_0 (vyprazdňování hladiny E_1).

Př. 2: Urči energii stavu E_1 a odhadni účinnost He-Ne laseru.

Pro energii fotonu platí: $E = hf = E_2 - E_1$.

$$E_2 - E_1 = h \frac{c}{\lambda} = 6,63 \cdot 10^{-34} \cdot \frac{3,00 \cdot 10^8}{632,8 \cdot 10^{-9}} \text{ J} = 3,14 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 1,96 \text{ eV}$$

$$E_1 = E_2 - \Delta E = 20,66 - 1,96 \text{ eV} = 18,7 \text{ eV}$$

Atomům hélia dodáváme energii 20,61 eV, atomy neonu vyzáří ve formě laserového paprsku energii 1,96 eV \Rightarrow účinnost laseru je menší než 10 %.

He-Ne laser je příkladem čtyřhladinového laseru (využívá čtyř energetických hladin).

Tříhladinový laser: Atomy čerpáme ze základní hladiny E_1 na hladinu E_3 , z ní atomy přecházejí na metastabilní hladinu E_2 . Přechod z hladiny E_2 zpět na hladinu E_1 probíhá stimulovanou emisí.

Laserová dioda

LED dioda vyzařuje tím, jak se elektrony zapadající v oblasti PN přechodu do děr zbavují energie vyzářením fotonu.

Laserová dioda: Elektrony se před zapadnutím do díry setkají s fotonem, který urychlí zapadnutí do díry a vyvolá stimulovanou emisi koherentního fotonu. Stimulovaná emise nastává většinou až po překročení prahového proudu.

Vyšší účinnost, malé rozměry.

Typy:

405 nm: InGaN (Blue Ray)

657 nm: AlGaInP (DVD, ukazovátka)

785 nm: GaAlAs (CD)

Př. 3: Čím musíme LED diodu vybavit, aby na PN přechodu mohlo dojít ke stimulované emisi?

Musíme zajistit dostatek fotonů na PN přechodu \Rightarrow okolo přechodu je nutné umístit zrcadla, která odrážejí fotony zpět na PN přechod, kde způsobí stimulovanou emisi.

Dodatek: Místo zrcátek se u laserových diod využívá odraz na stěně krystalu, ze kterého je vyrobena.

Využití laserů:

Krátká emise nezanedbatelného výkonu:

- tavení a odpařování materiálů (laserový skalpel, svařování, ...),
- pokusy s jadernou fúzí, výroba speciálních materiálů.

Koherentní záření:

- holografie,
- interferenční metody měření vzdálenosti.

Levné, malé laserové diody:

- čtecí lasery optických mechanik (CD, DVD, BlueRay),
- aktivní prvky v pro optická vlákna,
- ukazovátka.

Př. 4: Výkonné impulsní lasery slouží také ke stlačování látek obrovskými tlaky až 10^9 Pa .
Vysvětli.

Fotony mají hybnost $p = \frac{E}{c}$, kterou předávají látce \Rightarrow působí silou $F = \frac{\Delta p}{\Delta t}$.

$$p = \frac{F}{\Delta S} = \frac{\frac{\Delta p}{\Delta t}}{\Delta S} = \frac{\Delta p}{\Delta S \cdot \Delta t} = \frac{E}{c \cdot \Delta S \cdot \Delta t}, \text{ platí } \frac{E}{\Delta S \cdot \Delta t} = J_e \text{ (intenzita vyzařování).}$$
$$p = \frac{E}{c \cdot \Delta S \cdot \Delta t} = \frac{J_e}{c}$$

Př. 5: Vysvětli, jak je díky konstrukci laserů dosahováno mimořádných pozitivních vlastností jeho záření uvedených na začátku hodiny.

Monochromaticnost, koherence, směrovost, zaostřitelnost: způsobuje stimulovaná emise.

Směrovost, zaostřitelnost: světlo se mnohonásobně odráží uvnitř laseru než se dostane ven \Rightarrow všechny fotony, které nejsou kolmé k rovině zrcadel se utlumí dopadem na stěnu.

Časová říditelnost: Obrovská rychlost světla v krátkém laseru způsobí, že stimulovaná emise proběhne velmi rychle a pokud nečerpáme další atomy na vyšší hladinu, rychle ustane.

Př. 6: Najdi na internetu informace o principu holografie. Proč je třeba k vytváření holografických záznamů laser?

Dobrý popis je například na adrese http://moon.felk.cvut.cz/~pjh/Jak/_phys/f160/start.html.

Pro vytváření hologramů potřebujeme koherentní světlo \Rightarrow využití laseru.

Shrnutí: Koherentní světlo laseru získáme stimulovanou emisí.