

Laser

19 okt. 2026, 6 min läsning

UTKAST

#fysik #optik #modell

Kurs: F0005T Förkunskaper: Populationsinversion, Stimulerad emission

Lasern kombinerar populationsinversion med en resonator: speglar låter ljuset passera det aktiva mediet många gånger, så att varje foton hinner utlösa allt fler stimulerade emissioner. I fyra-nivålasern skapas inversionen genom excitationspumpning — elektriska urladdningar genom en gas ger elektroner och joner som exciterar atomer via krockar — och den sker mellan två exciterade nivåer, så den undre behöver inte vara grundtillståndet. Halvledarlasern ger i stället kontinuerlig drift och sitter i laserpekare, dvd och Blu-ray.

Formeln, symbol för symbol

$$\underbrace{hf}_{\text{laserfotonens energi}} = \underbrace{E_2}_{\text{övre laser-nivån}} - \underbrace{E_1}_{\text{undre laser-nivån}}$$
$$\underbrace{\eta_{\max}}_{\text{största verkningsgrad}} = \frac{\overbrace{E_2 - E_1}^{\text{ut per foton}}}{\underbrace{E_3}_{\text{in per atom}}}$$

Pumpen betalar hela vägen upp till E_3 , men laserfotonen tar bara med sig steget $E_2 - E_1$. Resten blir värme i de snabba övergångarna, och därför har laserljuset alltid längre våglängd än pumpljuset.

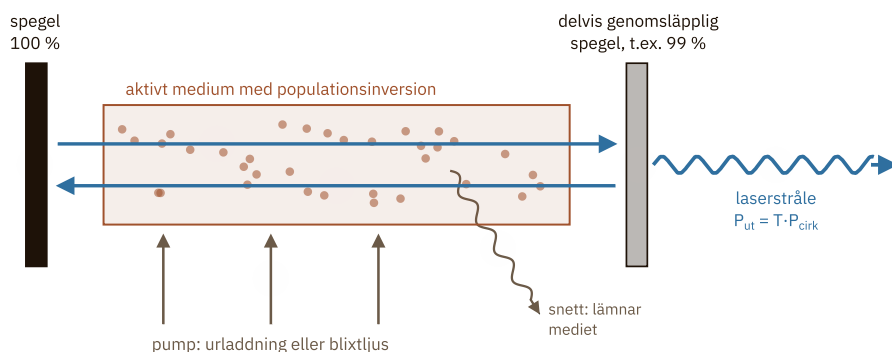
1. Tre ingredienser

Namnet är en förkortning av *light amplification by stimulated emission of radiation*, och en laser behöver tre delar:

1. **Ett aktivt medium** — en gas, ett fast ämne eller en halvledare med lämpliga energinivåer, där **stimulerad emission** kan förstärka ljuset.

2. **En pump** som tillför energi och håller uppe en **populationsinversion**, annars absorberar mediet mer än det förstärker.
3. **En resonator** — två speglar som skickar ljuset fram och tillbaka genom mediet, så att varje foton hinner stimulera många atomer.

Resultatet är en stråle som är nästan monokromatisk, parallell och koherent över hela tvärsnittet.



De tre delarna i en bild. Pumpen håller uppe inversionen i det aktiva mediet, och speglarna skickar ljuset längs axeln fram och tillbaka så att det förstärks vid varje passage. Fotoner som går snett lämnar mediet, och en liten andel av det cirkulerande ljuset släpps ut genom den delvis genomsläppliga spegeln.

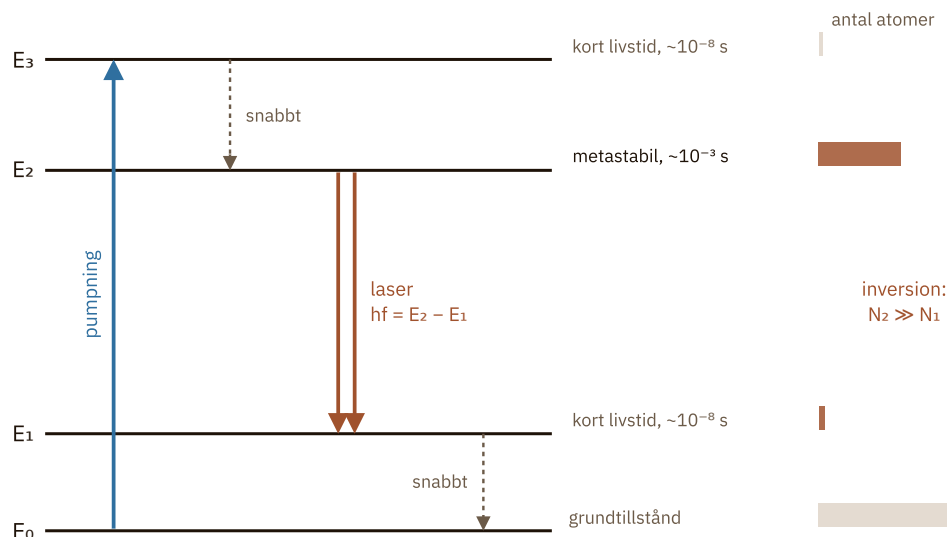
2. Fyra-nivålasern

Atomen har grundtillståndet $E_0 = 0$ och tre exciterade tillstånd $E_1 < E_2 < E_3$. E_1 och E_3 har vanliga livstider kring 10^{-8} s, medan E_2 är metastabilt med livstid kring 10^{-3} s.

1. **Före pumpning** är alla atomer i grundtillståndet.
2. **Pumpningen** lyfter atomer till E_1 , E_2 och E_3 .
3. **Efter ungefär 10^{-8} s** har E_3 tömts, delvis ned till E_2 , och E_1 har tömts till grundtillståndet. Atomerna har samlats i E_2 , som nu har fler atomer än det nästan tomma E_1 .
4. **Laserövergången $E_2 \rightarrow E_1$** startar med några spontana fotoner. Spegelarna skickar tillbaka dem genom mediet, och de stimulerar allt fler atomer i E_2 .

Laserfotonens energi är energiskillnaden i övergången, som i ett **linjespektrum**:

$$hf = E_2 - E_1$$



Fyra-nivålasern. Pumpningen lyfter atomer till E_3 , som snabbt faller till det metastabila E_2 .

Laserövergången går till E_1 , som i sin tur töms snabbt till grundtillståndet. Staplarna till höger visar populationerna strax efter pumpningen, schematiskt: E_2 har fler atomer än E_1 trots att grundtillståndet har flest.

Båda hjälpnivåerna fyller en funktion. E_3 matar E_2 med atomer, och E_1 gör inversionen lätt: eftersom den undre lasernivån töms snabbt räcker det med ett fåtal atomer i E_2 för att den ska ha fler än E_1 . Vore den undre lasernivån grundtillståndet skulle mer än hälften av alla atomer behöva pumpas upp.

Varje pumpning kostar minst E_3 per atom och varje laserfoton bär $E_2 - E_1$, så högst andelen

$$\eta_{\max} = \frac{E_2 - E_1}{E_3}$$

av pumpenergin kan komma ut som laserljus. Resten blir värme i de snabba övergångarna.

3. Resonatorn

Den ena spegeln reflekterar 100 %, den andra kanske 95–99 %. Fotoner som går snett ut ur mediet försvinner, medan de som går längs axeln passerar många gånger och tar över. Det är därför strålen blir parallell.

Den delvis genomsläppliga spegeln släpper ut en andel T av den effekt som cirkulerar i resonatorn:

$$P_{\text{ut}} = T P_{\text{cirk}}$$

Antalet fotoner per sekund i strålen följer ur effekten och fotonenergin, se [Fotonen](#).

4. Pulsad och kontinuerlig drift

En **pulsad laser** ger en blixtnär varje gång atomerna pumpas: inversionen byggs upp, töms genom stimulerad emission och byggs upp igen. I en **kontinuerlig laser** pumpas atomerna hela tiden. Då måste pumpningen vara så stark att lika många atomer per sekund förs upp till E_2 som lämnar E_2 genom emission, annars bryts inversionen.

Bara vissa material har rätt nivåstruktur. Gaslasrar och fasta lasrar med till exempel neodymglas använder atomernas nivåer. Den vanligaste typen, halvledarlasern i laserpekare, laserskrivare och dvd- och Blu-rayspelare, använder i stället **energiband** för elektroner som rör sig fritt i en **halvledare**.

Ett neonrör i en reklamskylt lyser med samma röda linje som en helium–neonlaser, men där sker bara spontan emission: det finns varken inversion eller speglar.

⚠ Vanliga fel

- **Laserfotonen får pumpenergin.** Den får $E_2 - E_1$, som är mindre än pumpenergin E_3 . Laserljuset har därför längre våglängd än pumpljuset.
- **Inversionen gäller mot grundtillståndet.** I fyra-nivålasern räcker det att E_2 har fler atomer än E_1 .
- **Båda speglarna reflekterar allt.** Då kommer ingen stråle ut; den ena måste släppa igenom en liten andel.
- **Kontinuerlig drift utan jämvikt i takterna.** Pumptakten in i E_2 måste vara minst lika stor som takten ut ur E_2 , annars upphör inversionen.
- **Halvledarlasern använder atomnivåer.** Den använder energiband i halvledaren.

5. Lösta exempel

☰ Exempel – En fyra-nivålaser

En fyra-nivålaser har nivåerna $E_1 = 0,25$ eV, $E_2 = 1,42$ eV och $E_3 = 1,80$ eV över grundtillståndet.

1. Vilken våglängd har laserljuset, och vilken våglängd måste pumpljuset ha för att lyfta atomer från grundtillståndet till E_3 ?
2. Hur stor andel av pumpenergin kan som mest komma ut som laserljus?
3. En puls tömmer $2,00 \cdot 10^{18}$ atomer i E_2 genom stimulerad emission under 10,0 ns. Bestäm pulsens energi och medeleffekt.

 Lösning

1. Våglängderna. Laserövergången har $E_2 - E_1 = 1,17$ eV, så

$$\lambda_{\text{laser}} = \frac{hc}{E_2 - E_1} = \frac{1240 \text{ eV} \cdot \text{nm}}{1,17 \text{ eV}} = \boxed{1060 \text{ nm}}$$

Fysika: Te (hc) Pumpningen kräver 1,80 eV:

$$\lambda_{\text{pump}} = \frac{1240 \text{ eV} \cdot \text{nm}}{1,80 \text{ eV}} = \boxed{689 \text{ nm}}$$

Laserljuset är infrarött, pumppljuset rött.

2. Största verkningsgraden.

$$\eta_{\text{max}} = \frac{E_2 - E_1}{E_3} = \frac{1,17}{1,80} = \boxed{65,0 \%}$$

3. Pulsen. Varje atom ger en foton med 1,17 eV:

$$E = 2,00 \cdot 10^{18} \cdot 1,17 \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J} = \boxed{0,375 \text{ J}}$$

$$P = \frac{E}{\Delta t} = \frac{0,375 \text{ J}}{10,0 \cdot 10^{-9} \text{ s}} = \boxed{3,75 \cdot 10^7 \text{ W}}$$

En måttlig energi blir en mycket hög effekt när den kommer ut på några nanosekunder.

Ej kontrollerat mot facit – två oberoende lösningar stämmer överens.

 Exempel – Helium–neonlaser i kontinuerlig drift

En helium–neonlaser ger 1,00 mW kontinuerligt vid 632,8 nm. Utgångsspeglarna släpper igenom 1,0 % och reflekterar resten.

1. Hur många fotoner per sekund lämnar lasern?
2. Hur stor effekt cirkulerar i resonatorn?

3. Hur många atomer per sekund måste minst pumpas upp till den övre lasernivån?

Lösning

1. Fotontakten. Fotonenergin är

$$hf = \frac{hc}{\lambda} = \frac{6,626 \cdot 10^{-34} \cdot 2,998 \cdot 10^8}{632,8 \cdot 10^{-9}} = 3,14 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

så

$$\frac{dN}{dt} = \frac{P}{hf} = \frac{1,00 \cdot 10^{-3}}{3,14 \cdot 10^{-19}} = \boxed{3,19 \cdot 10^{15} \text{ s}^{-1}}$$

2. Cirkulerande effekt. Ur $P_{\text{ut}} = T P_{\text{cirk}}$:

$$P_{\text{cirk}} = \frac{P_{\text{ut}}}{T} = \frac{1,00 \text{ mW}}{0,010} = \boxed{100 \text{ mW}}$$

3. Pumptakten. I kontinuerlig drift är antalet fotoner i resonatorn konstant. Varje foton som lämnar lasern ersätts av en stimulerad emission, och varje sådan tömmer en atom i den övre nivån. Pumpen måste därför föra upp minst

$$\boxed{3,19 \cdot 10^{15} \text{ atomer/s}}$$

I verkligheten krävs mer, eftersom en del atomer faller spontant och en del fotoner går förlorade i speglarna.

Ej kontrollerat mot facit — två oberoende lösningar stämmer överens.

Läsning

- 39.4 The Laser