

Fyzika laserových generátorů

Systémy s přenosem energie

Jan Šulc

Katedra fyzikální elektroniky
České vysoké učení technické
jan.sulc@fjfi.cvut.cz

15. dubna 2021

Fyzika laserových generátorů

Systémy s přenosem energie

Jan Šulc

Katedra fyzikální elektroniky
České vysoké učení technické
jan.sulc@fjfi.cvut.cz

15. dubna 2021

- ▶ Koncentrace dopantů v maticích pevnolátkových laserů se pohybuje mezi ~ 0 a 100 % (stoichiometrické laserové materiály)

- ▶ Koncentrace dopantů v maticích pevnolátkových laserů se pohybuje mezi ~ 0 a 100 % (stoichiometrické laserové materiály)
- ▶ Od určité koncentrace už nemohou být ionty příměsi považovány za nezávislá a izolovaná opticky aktivní centra, ale musí být uvážena jejich vzájemná interakce

- ▶ Koncentrace dopantů v maticích pevnolátkových laserů se pohybuje mezi ~ 0 a 100 % (stoichiometrické laserové materiály)
- ▶ Od určité koncentrace už nemohou být ionty příměsi považovány za nezávislá a izolovaná opticky aktivní centra, ale musí být uvážena jejich vzájemná interakce
 - ▶ Jsou pozorovány jevy jako koncentrační zhášení fluorescence (u Nd^{3+} a Er^{3+} pro koncentrace na úrovni 1 %, pro Yb^{3+} od cca 10 %)

- ▶ Koncentrace dopantů v maticích pevnolátkových laserů se pohybuje mezi ~ 0 a 100 % (stoichiometrické laserové materiály)
- ▶ Od určité koncentrace už nemohou být ionty příměsi považovány za nezávislá a izolovaná opticky aktivní centra, ale musí být uvážena jejich vzájemná interakce
 - ▶ Jsou pozorovány jevy jako koncentrační zhášení fluorescence (u Nd^{3+} a Er^{3+} pro koncentrace na úrovni 1 %, pro Yb^{3+} od cca 10 %)
 - ▶ U některých materiálů jsou jevy spojené s iont-iontovou interakcí patrné od velmi malých koncentrací ($\text{Tm}:\text{CaF}_2$ – dochází k párování iontů)

- ▶ Koncentrace dopantů v maticích pevnolátkových laserů se pohybuje mezi ~ 0 a 100 % (stoichiometrické laserové materiály)
- ▶ Od určité koncentrace už nemohou být ionty příměsi považovány za nezávislá a izolovaná opticky aktivní centra, ale musí být uvážena jejich vzájemná interakce
 - ▶ Jsou pozorovány jevy jako koncentrační zhašení fluorescence (u Nd^{3+} a Er^{3+} pro koncentrace na úrovni 1 %, pro Yb^{3+} od cca 10 %)
 - ▶ U některých materiálů jsou jevy spojené s iont-iontovou interakcí patrné od velmi malých koncentrací ($\text{Tm}:\text{CaF}_2$ – dochází k párování iontů)
 - ▶ Kombinace vysoké koncentrace aktivního iontů (Yb^{3+}) a stopové koncentrace nečistot (Er^{3+} , Tm^{3+}) se projeví zhašením fluorescence

- ▶ Koncentrace dopantů v maticích pevnolátkových laserů se pohybuje mezi ~ 0 a 100 % (stoichiometrické laserové materiály)
- ▶ Od určité koncentrace už nemohou být ionty příměsi považovány za nezávislá a izolovaná opticky aktivní centra, ale musí být uvážena jejich vzájemná interakce
 - ▶ Jsou pozorovány jevy jako koncentrační zhašení fluorescence (u Nd^{3+} a Er^{3+} pro koncentrace na úrovni 1 %, pro Yb^{3+} od cca 10 %)
 - ▶ U některých materiálů jsou jevy spojené s iont-iontovou interakcí patrné od velmi malých koncentrací ($\text{Tm}:\text{CaF}_2$ – dochází k párování iontů)
 - ▶ Kombinace vysoké koncentrace aktivního iontů (Yb^{3+}) a stopové koncentrace nečistot (Er^{3+} , Tm^{3+}) se projeví zhašením fluorescence
- ▶ Síla interakce záleží na vzdálenosti interagujících iontů

- ▶ Koncentrace dopantů v maticích pevnolátkových laserů se pohybuje mezi ~ 0 a 100 % (stoichiometrické laserové materiály)
- ▶ Od určité koncentrace už nemohou být ionty příměsi považovány za nezávislá a izolovaná opticky aktivní centra, ale musí být uvážena jejich vzájemná interakce
 - ▶ Jsou pozorovány jevy jako koncentrační zhašení fluorescence (u Nd^{3+} a Er^{3+} pro koncentrace na úrovni 1 %, pro Yb^{3+} od cca 10 %)
 - ▶ U některých materiálů jsou jevy spojené s iont-iontovou interakcí patrné od velmi malých koncentrací ($\text{Tm}:\text{CaF}_2$ – dochází k párování iontů)
 - ▶ Kombinace vysoké koncentrace aktivního iontů (Yb^{3+}) a stopové koncentrace nečistot (Er^{3+} , Tm^{3+}) se projeví zhašením fluorescence
- ▶ Síla interakce záleží na vzdálenosti interagující iontů
- ▶ Velikost koncentrace, která se projeví iont-iontovou interakcí záleží na tom, jestli ionty jsou

- ▶ Koncentrace dopantů v maticích pevnolátkových laserů se pohybuje mezi ~ 0 a 100 % (stoichiometrické laserové materiály)
- ▶ Od určité koncentrace už nemohou být ionty příměsi považovány za nezávislá a izolovaná opticky aktivní centra, ale musí být uvážena jejich vzájemná interakce
 - ▶ Jsou pozorovány jevy jako koncentrační zhašení fluorescence (u Nd^{3+} a Er^{3+} pro koncentrace na úrovni 1 %, pro Yb^{3+} od cca 10 %)
 - ▶ U některých materiálů jsou jevy spojené s iont-iontovou interakcí patrné od velmi malých koncentrací ($\text{Tm}:\text{CaF}_2$ – dochází k párování iontů)
 - ▶ Kombinace vysoké koncentrace aktivního iontů (Yb^{3+}) a stopové koncentrace nečistot (Er^{3+} , Tm^{3+}) se projeví zhašením fluorescence
- ▶ Síla interakce závisí na vzdálenosti interagující iontů
- ▶ Velikost koncentrace, která se projeví iont-iontovou interakcí závisí na tom, jestli ionty jsou
 - ▶ statisticky náhodně rozložené

- ▶ Koncentrace dopantů v maticích pevnolátkových laserů se pohybuje mezi ~ 0 a 100 % (stoichiometrické laserové materiály)
- ▶ Od určité koncentrace už nemohou být ionty příměsi považovány za nezávislá a izolovaná opticky aktivní centra, ale musí být uvážena jejich vzájemná interakce
 - ▶ Jsou pozorovány jevy jako koncentrační zhašení fluorescence (u Nd^{3+} a Er^{3+} pro koncentrace na úrovni 1 %, pro Yb^{3+} od cca 10 %)
 - ▶ U některých materiálů jsou jevy spojené s iont-iontovou interakcí patrné od velmi malých koncentrací ($\text{Tm}:\text{CaF}_2$ – dochází k párování iontů)
 - ▶ Kombinace vysoké koncentrace aktivního iontů (Yb^{3+}) a stopové koncentrace nečistot (Er^{3+} , Tm^{3+}) se projeví zhašením fluorescence
- ▶ Síla interakce záleží na vzdálenosti interagující iontů
- ▶ Velikost koncentrace, která se projeví iont-iontovou interakcí záleží na tom, jestli ionty jsou
 - ▶ statisticky náhodně rozložené
 - ▶ jestli existuje tendence ke korelované distribuci (tvorba párů, klastrů, linní...)

- ▶ Existují tři typy interakce, které se liší dosahem

- ▶ Existují tři typy interakce, které se liší dosahem
 1. Při silné vazbě vznikne nové optické centrum, které se liší svými vlastnostmi od původních iontů (páry Yb^{3+} a jejich kooperativní emise v zelené oblasti)

- ▶ Existují tři typy interakce, které se liší dosahem
 1. Při silné vazbě vznikne nové optické centrum, které se liší svými vlastnostmi od původních iontů (páry Yb^{3+} a jejich kooperativní emise v zelené oblasti)
 2. Při slabé vazbě si ionty zachovávají své původní vlastnosti, ale přenos energie nastává prostřednictvím nezářivých procesů (multipólová interakce)

- ▶ Existují tři typy interakce, které se liší dosahem
 1. Při silné vazbě vznikne nové optické centrum, které se liší svými vlastnostmi od původních iontů (páry Yb^{3+} a jejich kooperativní emise v zelené oblasti)
 2. Při slabé vazbě si ionty zachovají své původní vlastnosti, ale přenos energie nastává prostřednictvím nezářivých procesů (multipólová interakce)
 3. Ionty nejsou přímo vázané a energii si vyměňují zářivě (reabsorbce fluorescence)

- ▶ Existují tři typy interakce, které se liší dosahem
 1. Při silné vazbě vznikne nové optické centrum, které se liší svými vlastnostmi od původních iontů (páry Yb^{3+} a jejich kooperativní emise v zelené oblasti)
 2. Při slabé vazbě si ionty zachovají své původní vlastnosti, ale přenos energie nastává prostřednictvím nezářivých procesů (multipólová interakce)
 3. Ionty nejsou přímo vázané a energii si vyměňují zářivě (reabsorbce fluorescence)
- ▶ Se vzrůstající koncentrací se efekty často kombinují

- ▶ Opticky aktivní ionty jsou vzájemně silně Coulombovsky vázané.

- ▶ Opticky aktivní ionty jsou vzájemně silně Coulombovsky vázané.
- ▶ Ionty nelze popisovat jako nezávislé – vlnové funkce a energie vázaných iontů se silně liší.

- ▶ Opticky aktivní ionty jsou vzájemně silně Coulombovsky vázané.
- ▶ Ionty nelze popisovat jako nezávislé – vlnové funkce a energie vázaných iontů se silně liší.
- ▶ Orbitaly interagujících iontů se částečně překrývají

- ▶ Opticky aktivní ionty jsou vzájemně silně Coulombovsky vázané.
- ▶ Ionty nelze popisovat jako nezávislé – vlnové funkce a energie vázaných iontů se silně liší.
- ▶ Orbitaly interagujících iontů se částečně překrývají
- ▶ Pro nalezení příslušných vlnových funkcí a energií je třeba diagonalizovat nový hamiltonián soustavy

$$\hat{H}_{\text{pár}} = \hat{H}_1 + \hat{H}_2 + \hat{H}_{\text{int}}^{i-i} \quad \text{kde} \quad \hat{H}_{\text{int}}^{i-i} = -\frac{K}{\hbar^2} \hat{S}_1 \cdot \hat{S}_2$$

kde \hat{S}_i jsou operátory spinu a K je vazební konstanta

Iont-iontová interakce – silná vazba

- ▶ Opticky aktivní ionty jsou vzájemně silně Coulombovsky vázané.
- ▶ Ionty nelze popisovat jako nezávislé – vlnové funkce a energie vázaných iontů se silně liší.
- ▶ Orbitály interagujících iontů se částečně překrývají
- ▶ Pro nalezení příslušných vlnových funkcí a energií je třeba diagonalizovat nový hamiltonián soustavy

$$\hat{H}_{\text{pár}} = \hat{H}_1 + \hat{H}_2 + \hat{H}_{\text{int}}^{i-i} \quad \text{kde} \quad \hat{H}_{\text{int}}^{i-i} = -\frac{K}{\hbar^2} \hat{S}_1 \cdot \hat{S}_2$$

kde \hat{S}_i jsou operátory spinu a K je vazební konstanta

- ▶ V prvním přiblížení vede k dalšímu štěpení hladin. Velikost štěpení úměrná K (může být kladné i záporné).

Iont-iontová interakce – silná vazba

- ▶ Opticky aktivní ionty jsou vzájemně silně Coulombovsky vázané.
- ▶ Ionty nelze popisovat jako nezávislé – vlnové funkce a energie vázaných iontů se silně liší.
- ▶ Orbitály interagujících iontů se částečně překrývají
- ▶ Pro nalezení příslušných vlnových funkcí a energií je třeba diagonalizovat nový hamiltonián soustavy

$$\hat{H}_{\text{pár}} = \hat{H}_1 + \hat{H}_2 + \hat{H}_{\text{int}}^{i-i} \quad \text{kde} \quad \hat{H}_{\text{int}}^{i-i} = -\frac{K}{\hbar^2} \hat{S}_1 \cdot \hat{S}_2$$

kde \hat{S}_i jsou operátory spinu a K je vazební konstanta

- ▶ V prvním přiblížení vede k dalšímu štěpení hladin. Velikost štěpení úměrná K (může být kladné i záporné).
- ▶ Štěpení může ovlivnit jen některé hladiny (závisí na iontovém poloměru dané konfigurace)

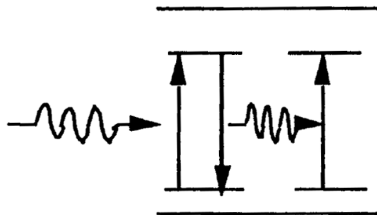
Iont-iontová interakce – silná vazba

- ▶ Opticky aktivní ionty jsou vzájemně silně Coulombovsky vázané.
- ▶ Ionty nelze popisovat jako nezávislé – vlnové funkce a energie vázaných iontů se silně liší.
- ▶ Orbitaly interagujících iontů se částečně překrývají
- ▶ Pro nalezení příslušných vlnových funkcí a energií je třeba diagonalizovat nový hamiltonián soustavy

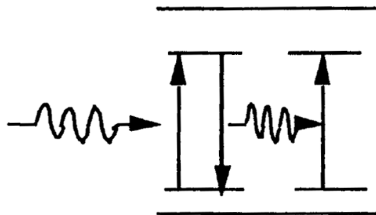
$$\hat{H}_{\text{pár}} = \hat{H}_1 + \hat{H}_2 + \hat{H}_{\text{int}}^{i-i} \quad \text{kde} \quad \hat{H}_{\text{int}}^{i-i} = -\frac{K}{\hbar^2} \hat{S}_1 \cdot \hat{S}_2$$

kde \hat{S}_i jsou operátory spinu a K je vazební konstanta

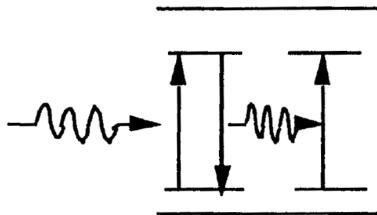
- ▶ V prvním přiblížení vede k dalšímu štěpení hladin. Velikost štěpení úměrná K (může být kladné i záporné).
- ▶ Štěpení může ovlivnit jen některé hladiny (závisí na iontovém poloměru dané konfigurace)
- ▶ Počet párů roste s kvadrátem koncentrace iontů \Rightarrow spektroskopické vlastnosti (např. intenzita přechodů) závisí na kvadrátu koncentrace



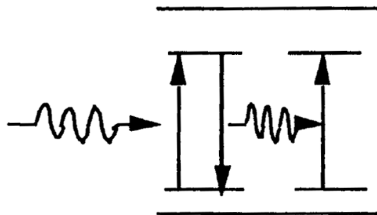
- ▶ Zářivý přenos energie nevyžaduje speciální fyzikální postupy



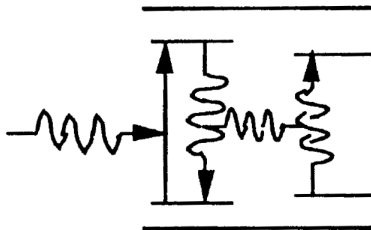
- ▶ Zářivý přenos energie nevyžaduje speciální fyzikální postupy
- ▶ Nastává v mnoha systémech a může významně ovlivnit spektroskopické vlastnosti (tvar emisních spekter, doby doznívání fluorescence)



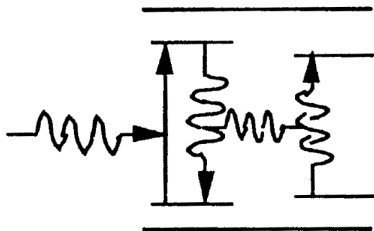
- ▶ Zářivý přenos energie nevyžaduje speciální fyzikální postupy
- ▶ Nastává v mnoha systémech a může významně ovlivnit spektroskopické vlastnosti (tvar emisních spekter, doby doznívání fluorescence)
- ▶ Nastává mezi různými ionty – důležitý je překryv emisních a absorpčních spekter



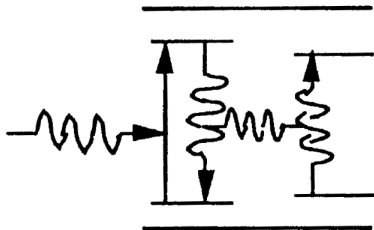
- ▶ Zářivý přenos energie nevyžaduje speciální fyzikální postupy
- ▶ Nastává v mnoha systémech a může významně ovlivnit spektroskopické vlastnosti (tvar emisních spekter, doby doznívání fluorescence)
- ▶ Nastává mezi různými ionty – důležitý je překryv emisních a absorpčních spekter
- ▶ Prodlužování doby doznívání fluorescence v důsledku záchytu fotonů (*radiative trapping*)



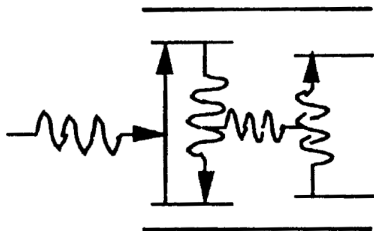
- ▶ Vazba neovlivňuje konfigurace a energetické hladiny zúčastněných iontů



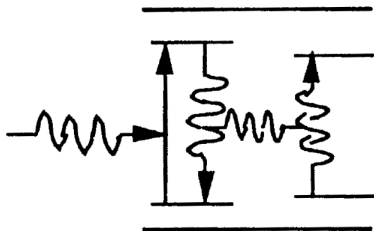
- ▶ Vazba neovlivňuje konfigurace a energetické hladiny zúčastněných iontů
- ▶ Má vliv na obsazení hladin



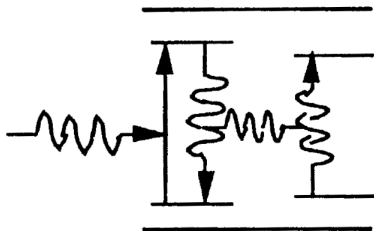
- ▶ Vazba neovlivňuje konfigurace a energetické hladiny zúčastněných iontů
- ▶ Má vliv na obsazení hladin
- ▶ Přenos energie na principu rezonance, který lze popsat jak emisi a absorpci nějaké virtuální částice (fonon, foton, exciton, Frenkelův exciton – silně vázaný pár elektron-díra, Wannierův exciton – slabě vázaný pár elektron-díra umožňující větší delokalizaci)



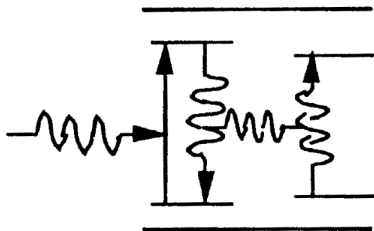
- ▶ Vazba neovlivňuje konfigurace a energetické hladiny zúčastněných iontů
- ▶ Má vliv na obsazení hladin
- ▶ Přenos energie na principu rezonance, který lze popsat jak emisi a absorpci nějaké virtuální částice (fonon, foton, exciton, Frenkelův exciton – silně vázaný pár elektron-díra, Wannierův exciton – slabě vázaný pár elektron-díra umožňující větší delokalizaci)
- ▶ Zásadní může být vliv teploty (účast fononů)



- ▶ Vazba neovlivňuje konfigurace a energetické hladiny zúčastněných iontů
- ▶ Má vliv na obsazení hladin
- ▶ Přenos energie na principu rezonance, který lze popsat jak emisi a absorpci nějaké virtuální částice (fonon, foton, exciton, Frenkelův exciton – silně vázaný pár elektron-díra, Wannierův exciton – slabě vázaný pár elektron-díra umožňující větší delokalizaci)
- ▶ Zásadní může být vliv teploty (účast fononů)
- ▶ Může probíhat v jednom nebo ve více krocích



- ▶ Vazba neovlivňuje konfigurace a energetické hladiny zúčastněných iontů
- ▶ Má vliv na obsazení hladin
- ▶ Přenos energie na principu rezonance, který lze popsat jak emisi a absorpci nějaké virtuální částice (fonon, foton, exciton, Frenkelův exciton – silně vázaný pár elektron-díra, Wannierův exciton – slabě vázaný pár elektron-díra umožňující větší delokalizaci)
- ▶ Zásadní může být vliv teploty (účast fononů)
- ▶ Může probíhat v jednom nebo ve více krocích
- ▶ Elektrická dipólová interakce má dosah desítky Å



- ▶ Vazba neovlivňuje konfigurace a energetické hladiny zúčastněných iontů
- ▶ Má vliv na obsazení hladin
- ▶ Přenos energie na principu rezonance, který lze popsat jak emisi a absorpci nějaké virtuální částice (fonon, foton, exciton, Frenkelův exciton – silně vázaný pár elektron-díra, Wannierův exciton – slabě vázaný pár elektron-díra umožňující větší delokalizaci)
- ▶ Zásadní může být vliv teploty (účast fononů)
- ▶ Může probíhat v jednom nebo ve více krocích
- ▶ Elektrická dipólová interakce má dosah desítky Å
- ▶ Elektrická multipólová interakce má dosah jednotky Å

- ▶ Přenos v jednom kroku Senzitizer (Donor) → Aktivátor (Akceptor)
(Forster-Dexter process)

- ▶ Přenos v jednom kroku Senzitizer (Donor) → Aktivátor (Akceptor)
(Forster-Dexter process)
- ▶ Elektromagenetická interkace – multipólový rozvoj

$$\hat{H}_{int}^{EM} = \hat{H}_{int}^{EDD} + \hat{H}_{int}^{EDQ} + \hat{H}_{int}^{EQD} + \hat{H}_{int}^{EQQ} + \dots + \hat{H}_{int}^{MDD} + \dots$$

Iont-iontová interakce – nežářivý přenos energie

- ▶ Přenos v jednom kroku Senzitizer (Donor) → Aktivátor (Akceptor) (Forster-Dexter process)
- ▶ Elektromagnetická interakce – multipólový rozvoj

$$\hat{H}_{int}^{EM} = \hat{H}_{int}^{EDD} + \hat{H}_{int}^{EDQ} + \hat{H}_{int}^{EQD} + \hat{H}_{int}^{EQQ} + \dots + \hat{H}_{int}^{MDD} + \dots$$

- ▶ Rychlost přenosu energie S → A při dipól-dipólové interakci

$$W_{sa}^{EDD} \approx \frac{1}{\tau_s^0} \left(\frac{R_0}{R_{sa}} \right)^6$$

kde R_{as} je vzdálenost A-S, R_0 je kritická interakční vzdálenost a $C_0 = (4/3\pi R_0^3)^{-1}$ je kritická koncentrace

Iont-iontová interakce – nezářivý přenos energie

- ▶ Přenos v jednom kroku Senzitizer (Donor) → Aktivátor (Akceptor) (Forster-Dexter process)
- ▶ Elektromagnetická interakce – multipólový rozvoj

$$\hat{H}_{int}^{EM} = \hat{H}_{int}^{EDD} + \hat{H}_{int}^{EDQ} + \hat{H}_{int}^{EQD} + \hat{H}_{int}^{EQQ} + \dots + \hat{H}_{int}^{MDD} + \dots$$

- ▶ Rychlost přenosu energie S → A při dipól-dipólové interakci

$$W_{sa}^{EDD} \approx \frac{1}{\tau_s^0} \left(\frac{R_0}{R_{sa}} \right)^6$$

kde R_{as} je vzdálenost A-S, R_0 je kritická interakční vzdálenost a $C_0 = (4/3\pi R_0^3)^{-1}$ je kritická koncentrace

- ▶ při dipól-kvadrupólové interakci:

$$W_{sa}^{EDQ} = W_{sa}^{EQD} \approx \frac{f_Q}{f_D} \left(\frac{\lambda}{R_{sa}} \right)^2 W_{sa}^{EDD}$$

Iont-iontová interakce – nezářivý přenos energie

- ▶ Přenos v jednom kroku Senzitizer (Donor) → Aktivátor (Akceptor) (Forster-Dexter process)
- ▶ Elektromagnetická interakce – multipólový rozvoj

$$\hat{H}_{int}^{EM} = \hat{H}_{int}^{EDD} + \hat{H}_{int}^{EDQ} + \hat{H}_{int}^{EQD} + \hat{H}_{int}^{EQQ} + \dots + \hat{H}_{int}^{MDD} + \dots$$

- ▶ Rychlost přenosu energie S → A při dipól-dipólové interakci

$$W_{sa}^{EDD} \approx \frac{1}{\tau_s^0} \left(\frac{R_0}{R_{sa}} \right)^6$$

kde R_{as} je vzdálenost A-S, R_0 je kritická interakční vzdálenost a $C_0 = (4/3\pi R_0^3)^{-1}$ je kritická koncentrace

- ▶ při dipól-kvadrupólové interakci:

$$W_{sa}^{EDQ} = W_{sa}^{EQD} \approx \frac{f_Q}{f_D} \left(\frac{\lambda}{R_{sa}} \right)^2 W_{sa}^{EDD}$$

- ▶ při kvadrupól-kvadrupólové interakci:

$$W_{sa}^{EQQ} \approx \left(\frac{f_Q}{f_D} \right)^2 \left(\frac{\lambda}{R_{sa}} \right)^4 W_{sa}^{EDD}$$

kde λ průměrná vlnová délka přechodů a $f_{D,Q}$ jsou síly oscilátorů v dipólové a kvadrupólové aproximaci

- ▶ Pro lanthanoidy se dá využít výsledků Judd-Ofeltovy teorie:

$$W_{sa}^{EDD} = \frac{1}{(2J_s + 1)(2J_a + 1)} \frac{2}{3} \frac{2\pi}{\hbar} \left(\frac{e^2}{R_{sa}^3} \right)^2 \int g_s(\nu) g_a(\nu) d\nu \\ \times \left(\sum_{\lambda} \Omega_{(\lambda s)} |\langle J_s \| U^{(\lambda)} \| J'_s \rangle|^2 \right) \left(\sum_{\lambda} \Omega_{(\lambda a)} |\langle J_a \| U^{(\lambda)} \| J'_a \rangle|^2 \right)$$

kde $\Omega_{(\lambda s, a)}$ jsou příslušné J-O koeficienty, $\langle J_{a, s} \| U^{(\lambda)} \| J'_{a, s} \rangle$ jsou maticové elementy redukovaných unitárních operátorů pro zúčastněné hladiny a $g_{s, a}(\nu)$ jsou tvary spektrálních čar příslušných přechodů

- ▶ Pro lanthanoidy se dá využít výsledků Judd-Ofeltovy teorie:

$$W_{sa}^{EDD} = \frac{1}{(2J_s + 1)(2J_a + 1)} \frac{2}{3} \frac{2\pi}{\hbar} \left(\frac{e^2}{R_{sa}^3} \right)^2 \int g_s(\nu) g_a(\nu) d\nu \\ \times \left(\sum_{\lambda} \Omega_{(\lambda s)} |\langle J_s \| U^{(\lambda)} \| J'_s \rangle|^2 \right) \left(\sum_{\lambda} \Omega_{(\lambda a)} |\langle J_a \| U^{(\lambda)} \| J'_a \rangle|^2 \right)$$

kde $\Omega_{(\lambda s, a)}$ jsou příslušné J-O koeficienty, $\langle J_{a, s} \| U^{(\lambda)} \| J'_{a, s} \rangle$ jsou maticové elementy redukovaných unitárních operátorů pro zúčastněné hladiny a $g_{s, a}(\nu)$ jsou tvary spektrálních čar příslušných přechodů

- ▶ Ve skutečnosti je R_{sa} náhodná veličina a je třeba stanovit *efektivní* rychlost přenosu energie, která závisí na tom, jak moc náhodné rozložení iontů v aktivním prostředí je

- ▶ Pro lanthanoidy se dá využít výsledků Judd-Ofeltovy teorie:

$$W_{sa}^{EDD} = \frac{1}{(2J_s + 1)(2J_a + 1)} \frac{2}{3} \frac{2\pi}{\hbar} \left(\frac{e^2}{R_{sa}^3} \right)^2 \int g_s(\nu) g_a(\nu) d\nu \\ \times \left(\sum_{\lambda} \Omega_{(\lambda s)} |\langle J_s \| U^{(\lambda)} \| J'_s \rangle|^2 \right) \left(\sum_{\lambda} \Omega_{(\lambda a)} |\langle J_a \| U^{(\lambda)} \| J'_a \rangle|^2 \right)$$

kde $\Omega_{(\lambda s, a)}$ jsou příslušné J-O koeficienty, $\langle J_{a, s} \| U^{(\lambda)} \| J'_{a, s} \rangle$ jsou maticové elementy redukovaných unitárních operátorů pro zúčastněné hladiny a $g_{s, a}(\nu)$ jsou tvary spektrálních čar příslušných přechodů

- ▶ Ve skutečnosti je R_{sa} náhodná veličina a je třeba stanovit *efektivní* rychlost přenosu energie, která závisí na tom, jak moc náhodné rozložení iontů v aktivním prostředí je
- ▶ V případě náhodného rozmístění s hustotou N_a po vybuzení v čase $t = 0$:

$$W^{EDD} = \frac{2\pi^{3/2}}{3} \frac{R_0^3 N_a}{\sqrt{\tau_s^0 t}}$$

- ▶ Pro lanthanoidy se dá využít výsledků Judd-Ofeltovy teorie:

$$W_{sa}^{EDD} = \frac{1}{(2J_s + 1)(2J_a + 1)} \frac{2}{3} \frac{2\pi}{\hbar} \left(\frac{e^2}{R_{sa}^3} \right)^2 \int g_s(\nu) g_a(\nu) d\nu \\ \times \left(\sum_{\lambda} \Omega_{(\lambda s)} |\langle J_s \| U^{(\lambda)} \| J'_s \rangle|^2 \right) \left(\sum_{\lambda} \Omega_{(\lambda a)} |\langle J_a \| U^{(\lambda)} \| J'_a \rangle|^2 \right)$$

kde $\Omega_{(\lambda s, a)}$ jsou příslušné J-O koeficienty, $\langle J_{a, s} \| U^{(\lambda)} \| J'_{a, s} \rangle$ jsou maticové elementy redukovaných unitárních operátorů pro zúčastněné hladiny a $g_{s, a}(\nu)$ jsou tvary spektrálních čar příslušných přechodů

- ▶ Ve skutečnosti je R_{sa} náhodná veličina a je třeba stanovit *efektivní* rychlost přenosu energie, která závisí na tom, jak moc náhodné rozložení iontů v aktivním prostředí je
- ▶ V případě náhodného rozmístění s hustotou N_a po vybuzení v čase $t = 0$:

$$W^{EDD} = \frac{2\pi^{3/2}}{3} \frac{R_0^3 N_a}{\sqrt{\tau_s^0 t}}$$

- ▶ Testování je možné provádět měření průběhu fluorescence a srovnáním s řešením rychlostní rovnice

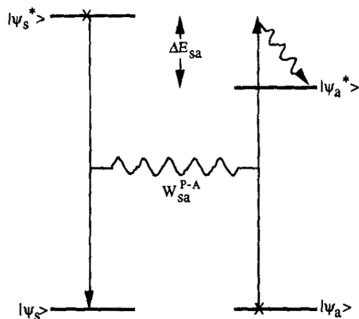
- ▶ Pokud nejsou energetické hladiny sensitizéru a aktivátoru v rezonanci, může chybějící/přebytečnou energii doplnit/odnést fonon

- ▶ Pokud nejsou energetické hladiny sensitizéru a aktivátoru v rezonanci, může chybějící/přebytečnou energii doplnit/odnést fonon
- ▶ Tvary spektrálních čar v překryvovém integrálu mohou být rozšířeny fononově asistovanou emisí/absorpací \Rightarrow přenos energie silně závislý na teplotě

- ▶ Pokud nejsou energetické hladiny sensitizéru a aktivátoru v rezonanci, může chybějící/přebytečnou energii doplnit/odnést fonon
- ▶ Tvary spektrálních čar v překryvovém integrálu mohou být rozšířeny fononově asistovanou emisí/absorpčí \Rightarrow přenos energie silně závislý na teplotě
- ▶ Interakční hamiltonián se doplní o elektron/ion-fononový interakční člen

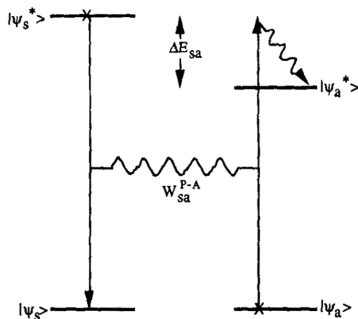
Iont-iontová interakce – nezářivý přenos energie za účasti fononů

- ▶ Pokud nejsou energetické hladiny sensitizéru a aktivátoru v rezonanci, může chybějící/přebytečnou energii doplnit/odnést fonon
- ▶ Tvary spektrálních čar v překryvovém integrálu mohou být rozšířeny fononově asistovanou emisí/absorcí \Rightarrow přenos energie silně závislý na teplotě
- ▶ Interakční hamiltonián se doplní o elektron/ion-fononový interakční člen



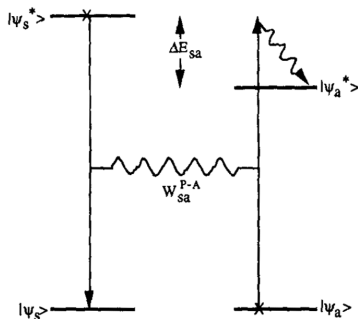
Iont-iontová interakce – nezářivý přenos energie za účasti fononů

- ▶ Pokud nejsou energetické hladiny sensitizéru a aktivátoru v rezonanci, může chybějící/přebytečnou energii doplnit/odnést fonon
- ▶ Tvary spektrálních čar v překryvovém integrálu mohou být rozšířeny fononově asistovanou emisí/absorcí \Rightarrow přenos energie silně závislý na teplotě
- ▶ Interakční hamiltonián se doplní o elektron/ion-fononový interakční člen
- ▶ Při interakci je důležitý i vztah mezi vzdáleností interagujících iontů a vlnovou délkou zúčastněného fononu (tedy rozdílem energie ΔE_{sa})



Iont-iontová interakce – nezáživý přenos energie za účasti fononů

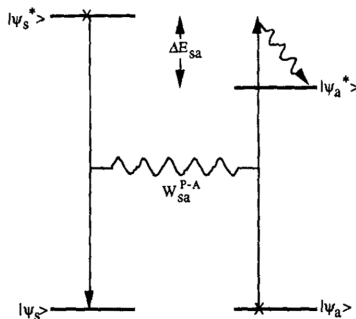
- ▶ Pokud nejsou energetické hladiny sensitizéru a aktivátoru v rezonanci, může chybějící/přebytečnou energii doplnit/odnést fonon
- ▶ Tvary spektrálních čar v překryvovém integrálu mohou být rozšířeny fononově asistovanou emisí/absorcí \Rightarrow přenos energie silně závislý na teplotě
- ▶ Interakční hamiltonián se doplní o elektron/ion-fononový interakční člen



- ▶ Při interakci je důležitý i vztah mezi vzdáleností interagujících iontů a vlnovou délkou zúčastněného fononu (tedy rozdílem energie ΔE_{sa})
- ▶ Pokud je $k_{ph} \cdot R_{sa} > 1$, interakce prakticky nezávisí na separaci S-A, pokud je $k_{ph} \cdot R_{sa} \ll 1$, interakce zprostředkovaná fonony je „koherentní“ a hrozí, že fonon bude modulovat oba ionty – pravděpodobnost přenosu energie roste s R_{sa}^2

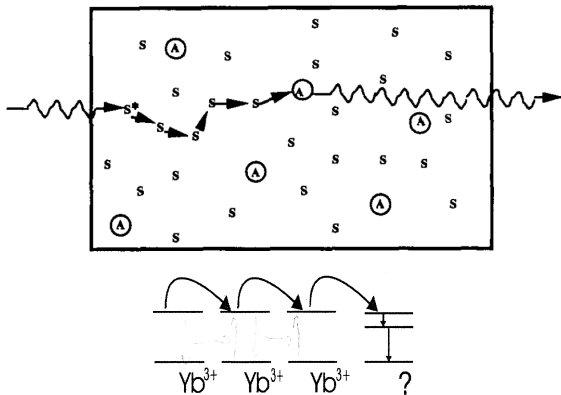
Iont-iontová interakce – nezářivý přenos energie za účasti fononů

- ▶ Pokud nejsou energetické hladiny sensitizéru a aktivátoru v rezonanci, může chybějící/přebytečnou energii doplnit/odnést fonon
- ▶ Tvary spektrálních čar v překryvovém integrálu mohou být rozšířeny fononově asistovanou emisí/absorcí \Rightarrow přenos energie silně závislý na teplotě
- ▶ Interakční hamiltonián se doplní o elektron/ion-fononový interakční člen



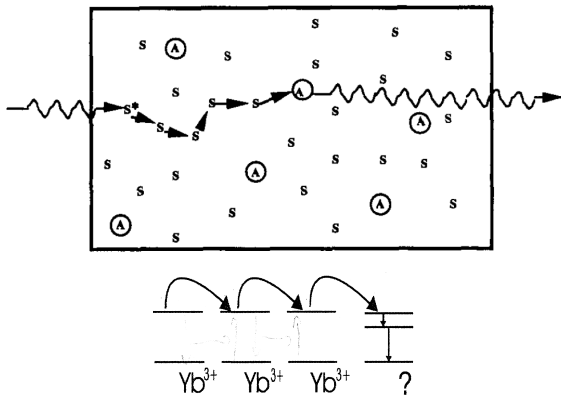
- ▶ Při interakci je důležitý i vztah mezi vzdáleností interagujících iontů a vlnovou délkou zúčastněného fononu (tedy rozdílem energie ΔE_{sa})
- ▶ Pokud je $k_{ph} \cdot R_{sa} > 1$, interakce prakticky nezávisí na separaci S-A, pokud je $k_{ph} \cdot R_{sa} \ll 1$, interakce zprostředkovaná fonony je „koherentní“ a hrozí, že fonon bude modulovat oba ionty – pravděpodobnost přenosu energie roste s R_{sa}^2
- ▶ Přenosu energie se může účastnit víc než jeden fonon – rychlost přenosu energie je pak ale silně (exponenciálně) závislá na teplotě (ochlazení může přenos omezit)

Iont-iontová interakce – migrace energie



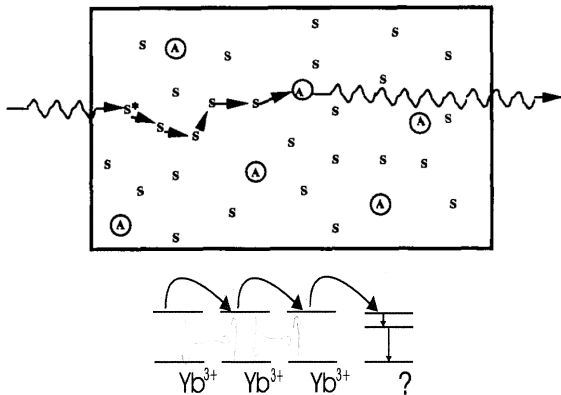
- Migrace energie (migrace Frenkelova excitonu)

Iont-iontová interakce – migrace energie



- ▶ Migrace energie (migrace Frenkelova excitonu)
- ▶ Přenos energie = migrace + záchyt

Iont-iontová interakce – migrace energie

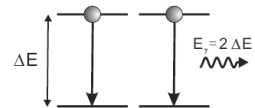


- ▶ Migrace energie (migrace Frenkelova excitonu)
- ▶ Přenos energie = migrace + záchyt
- ▶ Difúze, náhodná procházka, simulace Monte-Carlo. . .

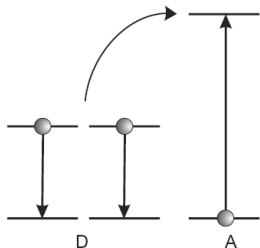
$$W_{sa}^D \approx 4\pi DR_T C_a$$

kde D je difúzní koeficient, R_T je efektivní vzdálenost pro záchyt a C_a je koncentrace pastí (aktivátorů)

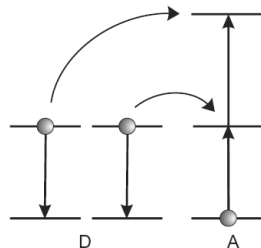
Iont-iontová interakce – „upkonverze“



Cooperative Luminescence



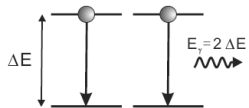
Cooperative Energy Transfer



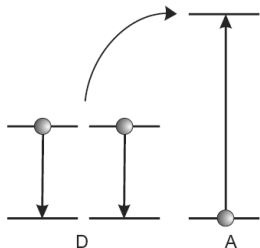
APTE Energy Transfer

► Kooperativní fluorescence

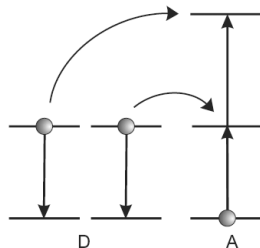
Ion-ionová interakce – „upkonverze“



Cooperative Luminescence



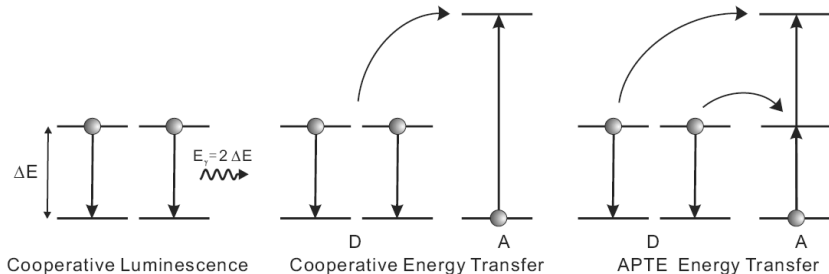
Cooperative Energy Transfer



APTE Energy Transfer

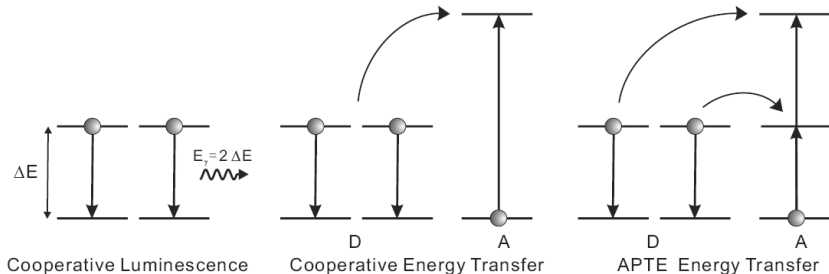
- ▶ Kooperativní fluorescence
- ▶ Kooperativní upkonverze

Iont-iontová interakce – „upkonverze“



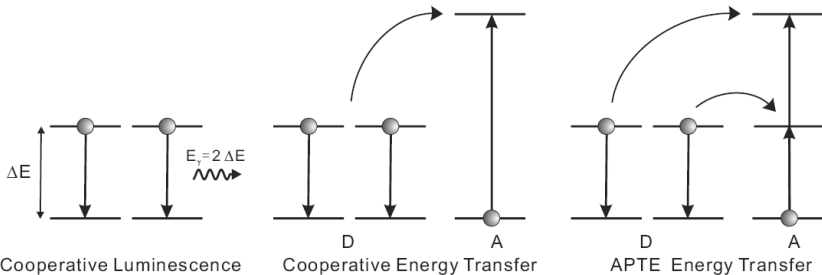
- ▶ Kooperativní fluorescence
- ▶ Kooperativní upkonverze
- ▶ Upkonverze v důsledku křížové relaxace

Iont-iontová interakce – „upkonverze“

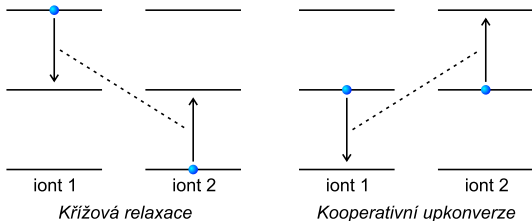


- ▶ Kooperativní fluorescence
- ▶ Kooperativní upkonverze
- ▶ Upkonverze v důsledku křížové relaxace

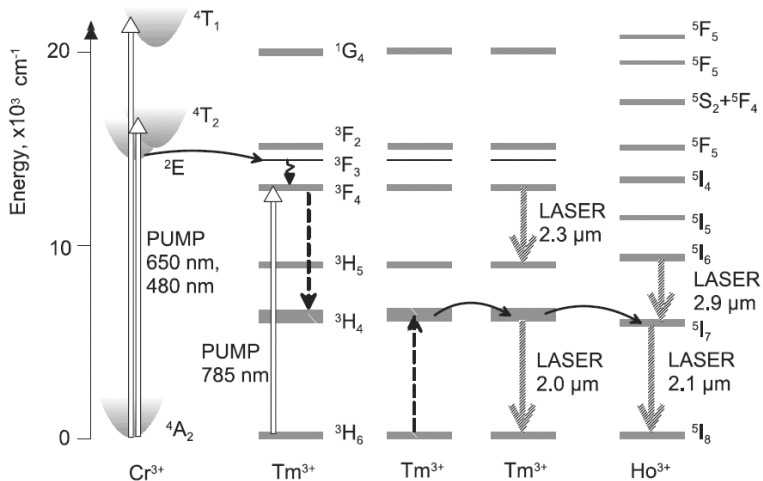
Iont-iontová interakce – „upkonverze“



- ▶ Kooperativní fluorescence
- ▶ Kooperativní upkonverze
- ▶ Upkonverze v důsledku křížové relaxace



Ion-ionová interakce – kodopace



- Buzení procesem Senzitizer → Aktivator (CTH:YAG)

Spektroskopické vlastnosti aktivního prostředí ve vztahu k činnosti laseru

- ▶ Čtyřhladinové aktivní prostředí – rychlostní rovnice:

$$\frac{dn}{dt} = F^{\text{pump}} \sigma_{\text{GSA}} (N_t - n) - F^{\text{las}} \sigma_{\text{em}} n - \frac{n}{\tau} - \alpha n^2,$$

čerpání, stimulovaná a spontánní emise, up-konverze s *makroparimetrem* α .

$$\frac{dF^{\text{las}}}{dt} = \frac{c}{l} F^{\text{las}} \sigma_{\text{em}} n l_a - \frac{F^{\text{las}}}{\tau_c} - \frac{c}{l} F^{\text{las}} \sigma_{\text{ESA}}^{\text{las}} n l_a$$

stimulovaná emise, ztráty, ESA.

Spektroskopické vlastnosti aktivního prostředí ve vztahu k činnosti laseru

- ▶ Čtyřhladinové aktivní prostředí – rychlostní rovnice:

$$\frac{dn}{dt} = F^{\text{pump}} \sigma_{\text{GSA}} (N_t - n) - F^{\text{las}} \sigma_{\text{em}} n - \frac{n}{\tau} - \alpha n^2,$$

čerpání, stimulovaná a spontánní emise, up-konverze s *makroparametrem* α .

$$\frac{dF^{\text{las}}}{dt} = \frac{c}{l} F^{\text{las}} \sigma_{\text{em}} n l_a - \frac{F^{\text{las}}}{\tau_c} - \frac{c}{l} F^{\text{las}} \sigma_{\text{ESA}}^{\text{las}} n l_a$$

stimulovaná emise, ztráty, ESA.

- ▶ CW řešení:

$$n_{\text{th}} = \frac{T + L}{l_a (\sigma_{\text{em}} - \sigma_{\text{ESA}}^{\text{las}})}$$

$$P_{\text{th}}^{\text{abs}} = (T + L) \frac{h\nu^{\text{las}}}{\sigma_{\text{em}} \tau} \frac{\lambda^{\text{las}}}{\lambda^{\text{pump}}} A^{\text{pump}} (1 + \alpha n_{\text{th}} \tau) \left(1 - \frac{\sigma_{\text{ESA}}^{\text{las}}}{\sigma_{\text{em}}}\right)^{-1} \left(1 + \frac{\sigma_{\text{ESA}}^{\text{pump}} n_{\text{th}}}{\sigma_{\text{GSA}} (N_t - n_{\text{th}})}\right)$$

$$\eta_{\text{slope}} = \frac{T}{T + L} \frac{\lambda^{\text{pump}}}{\lambda^{\text{las}}} \left(1 - \frac{\sigma_{\text{ESA}}^{\text{las}}}{\sigma_{\text{em}}}\right) \left(1 + \frac{\sigma_{\text{ESA}}^{\text{pump}} n_{\text{th}}}{\sigma_{\text{GSA}} (N_t - n_{\text{th}})}\right)^{-1}$$

Spektroskopické vlastnosti aktivního prostředí ve vztahu k činnosti laseru

- ▶ Up-konverze a redukce doby života aktivního iontu s teplotou sice vede ke zvýšení prahu generace, ale nemá vliv na diferenciální účinnost laseru

Spektroskopické vlastnosti aktivního prostředí ve vztahu k činnosti laseru

- ▶ Up-konverze a redukce doby života aktivního iontu s teplotou sice vede ke zvýšení prahu generace, ale nemá vliv na diferenciální účinnost laseru
- ▶ Aby bylo možné snížit ztráty způsobené up-konverzí na minimum ($\alpha n_{th} \tau \ll 1$), je potřeba co možná nejvíce snížit celkové ztráty $T + L$, aby došlo ke snížení prahové inverze populace hladin

Spektroskopické vlastnosti aktivního prostředí ve vztahu k činnosti laseru

- ▶ Up-konverze a redukce doby života aktivního iontu s teplotou sice vede ke zvýšení prahu generace, ale nemá vliv na diferenciální účinnost laseru
- ▶ Aby bylo možné snížit ztráty způsobené up-konverzí na minimum ($\alpha n_{th} \tau \ll 1$), je potřeba co možná nejvíce snížit celkové ztráty $T + L$, aby došlo ke snížení prahové inverze populace hladin
- ▶ Ztráty L a ESA mají vliv jak na práh generace, tak na diferenciální účinnost laseru. Nicméně, ESA na vlnové délce čerpacího záření má v případě čtyřúrovňového aktivního prostředí pouze zanedbatelný vliv, neboť $n_{th} < N_i$ a její vliv může být dále snížen snížením ztrát, respektive prahu generace

Spektroskopické vlastnosti aktivního prostředí ve vztahu k činnosti laseru

- ▶ Up-konverze a redukce doby života aktivního iontu s teplotou sice vede ke zvýšení prahu generace, ale nemá vliv na diferenciální účinnost laseru
- ▶ Aby bylo možné snížit ztráty způsobené up-konverzí na minimum $(\alpha n_{th} \tau) \ll 1$, je potřeba co možná nejvíce snížit celkové ztráty $T + L$, aby došlo ke snížení prahové inverze populace hladin
- ▶ Ztráty L a ESA mají vliv jak na práh generace, tak na diferenciální účinnost laseru. Nicméně, ESA na vlnové délce čerpacího záření má v případě čtyřúrovňového aktivního prostředí pouze zanedbatelný vliv, neboť $n_{th} < N_i$ a její vliv může být dále snížen snížením ztrát, respektive prahu generace
- ▶ Vliv reabsorpce na vlastnosti generace laseru je nejednoznačný

Spektroskopické vlastnosti aktivního prostředí ve vztahu k činnosti laseru

- ▶ Up-konverze a redukce doby života aktivního iontu s teplotou sice vede ke zvýšení prahu generace, ale nemá vliv na diferenciální účinnost laseru
- ▶ Aby bylo možné snížit ztráty způsobené up-konverzí na minimum $(\alpha n_{th} \tau) \ll 1$, je potřeba co možná nejvíce snížit celkové ztráty $T + L$, aby došlo ke snížení prahové inverze populace hladin
- ▶ Ztráty L a ESA mají vliv jak na práh generace, tak na diferenciální účinnost laseru. Nicméně, ESA na vlnové délce čerpacího záření má v případě čtyřúrovňového aktivního prostředí pouze zanedbatelný vliv, neboť $n_{th} < N_i$ a její vliv může být dále snížen snížením ztrát, respektive prahu generace
- ▶ Vliv reabsorpce na vlastnosti generace laseru je nejednoznačný
 - ▶ Přímým důsledkem reabsorpce je prodloužení doby života a to v první aproximaci vede k efektivnímu snížení prahu činnosti laseru.

Spektroskopické vlastnosti aktivního prostředí ve vztahu k činnosti laseru

- ▶ Up-konverze a redukce doby života aktivního iontu s teplotou sice vede ke zvýšení prahu generace, ale nemá vliv na diferenciální účinnost laseru
- ▶ Aby bylo možné snížit ztráty způsobené up-konverzí na minimum ($\alpha n_{th} \tau \ll 1$), je potřeba co možná nejvíce snížit celkové ztráty $T + L$, aby došlo ke snížení prahové inverze populace hladin
- ▶ Ztráty L a ESA mají vliv jak na práh generace, tak na diferenciální účinnost laseru. Nicméně, ESA na vlnové délce čerpacího záření má v případě čtyřúrovňového aktivního prostředí pouze zanedbatelný vliv, neboť $n_{th} < N_i$ a její vliv může být dále snížen snížením ztrát, respektive prahu generace
- ▶ Vliv reabsorpce na vlastnosti generace laseru je nejednoznačný
 - ▶ Příímým důsledkem reabsorpce je prodloužení doby života a to v první aproximaci vede k efektivnímu snížení prahu činnosti laseru.
 - ▶ Reabsorpce zvyšuje pravděpodobnost přenosu energie, a to zvláště v případě up-konverze. V laserových systémech, kde up-konverze představuje ztrátový mechanismus pak reabsorpce představuje ztráty.

Spektroskopické vlastnosti aktivního prostředí ve vztahu k činnosti laseru

- ▶ Up-konverze a redukce doby života aktivního iontu s teplotou sice vede ke zvýšení prahu generace, ale nemá vliv na diferenciální účinnost laseru
- ▶ Aby bylo možné snížit ztráty způsobené up-konverzí na minimum ($\alpha n_{th} \tau \ll 1$), je potřeba co možná nejvíce snížit celkové ztráty $T + L$, aby došlo ke snížení prahové inverze populace hladin
- ▶ Ztráty L a ESA mají vliv jak na práh generace, tak na diferenciální účinnost laseru. Nicméně, ESA na vlnové délce čerpacího záření má v případě čtyřúrovňového aktivního prostředí pouze zanedbatelný vliv, neboť $n_{th} < N_i$ a její vliv může být dále snížen snížením ztrát, respektive prahu generace
- ▶ Vliv reabsorpce na vlastnosti generace laseru je nejednoznačný
 - ▶ Příímým důsledkem reabsorpce je prodloužení doby života a to v první aproximaci vede k efektivnímu snížení prahu činnosti laseru.
 - ▶ Reabsorpce zvyšuje pravděpodobnost přenosu energie, a to zvláště v případě up-konverze. V laserových systémech, kde up-konverze představuje ztrátový mechanismus pak reabsorpce představuje ztráty.
 - ▶ V laserových systémech, které využijí up-konverzní čerpání (například Er-lasery pracující na vlnové délce $3 \mu\text{m}$), reabsorpce ve svém důsledku vede k zlepšení účinnosti.

- ▶ Naměřená luminiscenční doba života τ sestává z čistě zářivých, ale i nezářivých, složek:

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_{\text{rad}}} + \frac{1}{\tau_{\text{nr}}}$$

- ▶ Naměřená luminiscenční doba života τ sestává z čistě zářivých, ale i nezářivých, složek:

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_{\text{rad}}} + \frac{1}{\tau_{\text{nr}}}$$

- ▶ Zářivá doba života (doba života za kterou nesou odpovědnost zářivé přechody) širokopásmového přechodu:

$$\frac{1}{\tau_{\text{rad}}} = A = 8cn^2 \int \frac{\sigma_{\text{em}}(\lambda) d\lambda}{\lambda^4} \approx 8cn^2 \sigma_{\text{em}}(\lambda_0) \frac{1}{\lambda_0^3} \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0}$$

tj. obecně je doba života nepřímo úměrná šířce emisní čáry.

- ▶ Naměřená luminiscenční doba života τ sestává z čistě zářivých, ale i nezářivých, složek:

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_{\text{rad}}} + \frac{1}{\tau_{\text{nr}}}$$

- ▶ Zářivá doba života (doba života za kterou nesou odpovědnost zářivé přechody širokopásmového přechodu:

$$\frac{1}{\tau_{\text{rad}}} = A = 8cn^2 \int \frac{\sigma_{\text{em}}(\lambda)d\lambda}{\lambda^4} \approx 8cn^2 \sigma_{\text{em}}(\lambda_0) \frac{1}{\lambda_0^3} \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0}$$

tj. obecně je doba života nepřímo úměrná šířce emisní čáry.

- ▶ Prahová *absorbovaná* čerpací intenzita:

$$I_{\text{th}} \propto \frac{\alpha_{\text{loss}}}{\alpha_{\text{abs}}} \frac{h\nu}{\sigma(\nu)\tau} = \frac{1}{FOM} \frac{1}{\eta_{\text{QE}}} \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} \frac{n^2}{\lambda_0^4} \quad \text{kde} \quad \eta_{\text{QE}} = \frac{\tau}{\tau_{\text{rad}}} \quad \text{a} \quad FOM = \frac{\sigma_a(\nu^{\text{pump}})}{\sigma_a(\nu^{\text{las}})}$$

- ▶ Naměřená luminiscenční doba života τ sestává z čistě zářivých, ale i nezářivých, složek:

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_{\text{rad}}} + \frac{1}{\tau_{\text{nr}}}$$

- ▶ Zářivá doba života (doba života za kterou nesou odpovědnost zářivé přechody širokopásmového přechodu:

$$\frac{1}{\tau_{\text{rad}}} = A = 8cn^2 \int \frac{\sigma_{\text{em}}(\lambda)d\lambda}{\lambda^4} \approx 8cn^2 \sigma_{\text{em}}(\lambda_0) \frac{1}{\lambda_0^3} \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0}$$

tj. obecně je doba života nepřímo úměrná šířce emisní čáry.

- ▶ Prahová *absorbovaná* čerpací intenzita:

$$I_{\text{th}} \propto \frac{\alpha_{\text{loss}}}{\alpha_{\text{abs}}} \frac{h\nu}{\sigma(\nu)\tau} = \frac{1}{FOM} \frac{1}{\eta_{\text{QE}}} \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} \frac{n^2}{\lambda_0^4} \quad \text{kde} \quad \eta_{\text{QE}} = \frac{\tau}{\tau_{\text{rad}}} \quad \text{a} \quad FOM = \frac{\sigma_a(\nu^{\text{pump}})}{\sigma_a(\nu^{\text{las}})}$$

- ▶ Faktor λ^4 v jmenovateli efektivně se snižuje práh generace pro přechody s delší vlnovou délkou

- ▶ Naměřená luminiscenční doba života τ sestává z čistě zářivých, ale i nezářivých, složek:

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_{\text{rad}}} + \frac{1}{\tau_{\text{nr}}}$$

- ▶ Zářivá doba života (doba života za kterou nesou odpovědnost zářivé přechody širokopásmového přechodu:

$$\frac{1}{\tau_{\text{rad}}} = A = 8cn^2 \int \frac{\sigma_{\text{em}}(\lambda)d\lambda}{\lambda^4} \approx 8cn^2 \sigma_{\text{em}}(\lambda_0) \frac{1}{\lambda_0^3} \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0}$$

tj. obecně je doba života nepřímo úměrná šířce emisní čáry.

- ▶ Prahová *absorbovaná* čerpací intenzita:

$$I_{\text{th}} \propto \frac{\alpha_{\text{loss}}}{\alpha_{\text{abs}}} \frac{h\nu}{\sigma(\nu)\tau} = \frac{1}{FOM} \frac{1}{\eta_{\text{QE}}} \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} \frac{n^2}{\lambda_0^4} \quad \text{kde} \quad \eta_{\text{QE}} = \frac{\tau}{\tau_{\text{rad}}} \quad \text{a} \quad FOM = \frac{\sigma_a(\nu^{\text{pump}})}{\sigma_a(\nu^{\text{las}})}$$

- ▶ Faktor λ^4 v jmenovateli efektivně se snižuje práh generace pro přechody s delší vlnovou délkou
- ▶ Kvalitní materiál $\Leftrightarrow FOM > 100$

- ▶ Procesy ion-iontové interakce

- ▶ Procesy ion-iontové interakce
 - ▶ probíhají v širokém rozsahu koncentrací na různé vzdálenosti

- ▶ Procesy ion-iontové interakce
 - ▶ probíhají v širokém rozsahu koncentrací na různé vzdálenosti
 - ▶ probíhají za účasti různých reálných a virtuálních částic

- ▶ Procesy ion-iontové interakce
 - ▶ probíhají v širokém rozsahu koncentrací na různé vzdálenosti
 - ▶ probíhají za účasti různých reálných a virtuálních částic
 - ▶ Silná interakce vede obecně ke vzniku nových energetických hladin

- ▶ Procesy ion-iontové interakce
 - ▶ probíhají v širokém rozsahu koncentrací na různé vzdálenosti
 - ▶ probíhají za účasti různých reálných a virtuálních částic
 - ▶ Silná interakce vede obecně ke vzniku nových energetických hladin
 - ▶ Slabá interakce modifikuje obsazení hladin (doby života)




- ▶ Procesy ion-iontové interakce
 - ▶ probíhají v širokém rozsahu koncentrací na různé vzdálenosti
 - ▶ probíhají za účasti různých reálných a virtuálních částic
 - ▶ Silná interakce vede obecně ke vzniku nových energetických hladin
 - ▶ Slabá interakce modifikuje obsazení hladin (doby života)
 - ▶ Zářivý přenos energie funguje na velké vzdálenosti

- ▶ Procesy ion-iontové interakce
 - ▶ probíhají v širokém rozsahu koncentrací na různé vzdálenosti
 - ▶ probíhají za účasti různých reálných a virtuálních částic
 - ▶ Silná interakce vede obecně ke vzniku nových energetických hladin
 - ▶ Slabá interakce modifikuje obsazení hladin (doby života)
 - ▶ Zářivý přenos energie funguje na velké vzdálenosti
 - ▶ Obecně mohou být teplotně závislé

- ▶ Procesy ion-iontové interakce
 - ▶ probíhají v širokém rozsahu koncentrací na různé vzdálenosti
 - ▶ probíhají za účasti různých reálných a virtuálních částic
 - ▶ Silná interakce vede obecně ke vzniku nových energetických hladin
 - ▶ Slabá interakce modifikuje obsazení hladin (doby života)
 - ▶ Zářivý přenos energie funguje na velké vzdálenosti
 - ▶ Obecně mohou být teplotně závislé
 - ▶ Obecně se kombinují různé procesy současně

- ▶ Procesy ion-iontové interakce
 - ▶ probíhají v širokém rozsahu koncentrací na různé vzdálenosti
 - ▶ probíhají za účasti různých reálných a virtuálních částic
 - ▶ Silná interakce vede obecně ke vzniku nových energetických hladin
 - ▶ Slabá interakce modifikuje obsazení hladin (doby života)
 - ▶ Zářivý přenos energie funguje na velké vzdálenosti
 - ▶ Obecně mohou být teplotně závislé
 - ▶ Obecně se kombinují různé procesy současně
 - ▶ Pokud je jejich působení nežádoucí, je třeba snížit koncentrací dopantů a nečistot (pastí) a populaci hladin (práh laseru)

- ▶ Procesy ion-iontové interakce
 - ▶ probíhají v širokém rozsahu koncentrací na různé vzdálenosti
 - ▶ probíhají za účasti různých reálných a virtuálních částic
 - ▶ Silná interakce vede obecně ke vzniku nových energetických hladin
 - ▶ Slabá interakce modifikuje obsazení hladin (doby života)
 - ▶ Zářivý přenos energie funguje na velké vzdálenosti
 - ▶ Obecně mohou být teplotně závislé
 - ▶ Obecně se kombinují různé procesy současně
 - ▶ Pokud je jejich působení nežádoucí, je třeba snížit koncentrací dopantů a nečistot (pastí) a populaci hladin (práh laseru)
 - ▶ Jejich efekt je často i žádoucí (přenos energie z prvků s širokými absorpčními pásy s velkou absorpcí, depopulace vybraných energetických hladin)

-  RICHARD C. POWELL: *Physics of solid-state laser materials*, Springer-Verlag, 1998
-  BRIAN HENDERSON AND RALPH H. BARTRAM: *Crystal-field engineering of solid-state laser materials*, Cambridge University Press, 2000
-  Přednášky: <http://people.fjfi.cvut.cz/sulcjan1/FLT/>