

Vybrané kapitoly z moderní optiky

Diodově čerpané pevnolátkové lasery

Jan Šulc

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

7. prosince 2012

Laser a laserové záření

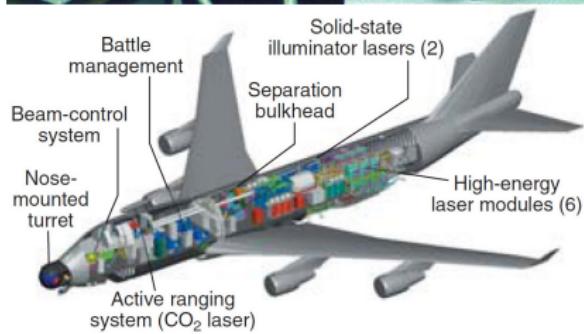
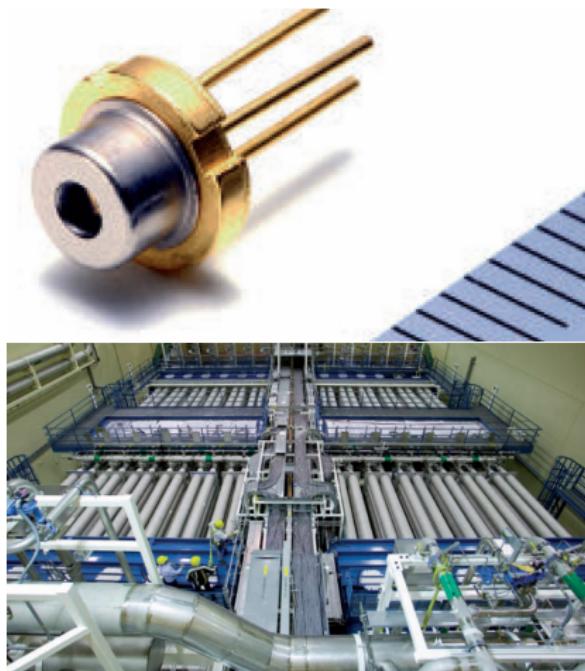
- Generátor (zesilovač) světla využívající *stimulované emise fotonů*

Laser a laserové záření

- ▶ Generátor (zesilovač) světla využívající *stimulované emise* fotonů
- ▶ Koherence, koncentrace energie (směr a čas), monochormatičnost

Laser a laserové záření

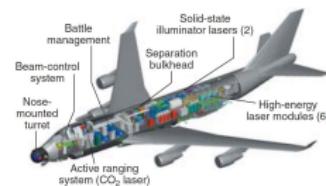
- ▶ Generátor (zesilovač) světla využívající *stimulované emise fotonů*
- ▶ Koherence, koncentrace energie (směr a čas), monochromatičnost



Laser

Laser a laserové záření

- ▶ Generátor (zesilovač) světla využívající *stimulované emise fotonů*
- ▶ Koherence, koncentrace energie (směr a čas), monochromatičnost

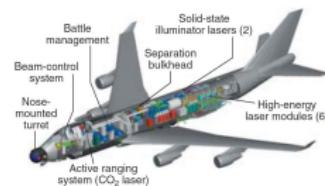


Základní elementy laseru

Laser

Laser a laserové záření

- ▶ Generátor (zesilovač) světla využívající *stimulované emise fotonů*
- ▶ Koherence, koncentrace energie (směr a čas), monochromatičnost



Základní elementy laseru

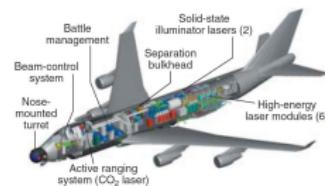
- ▶ Laserové aktivní prostředí

Aktivní prostředí

Laser

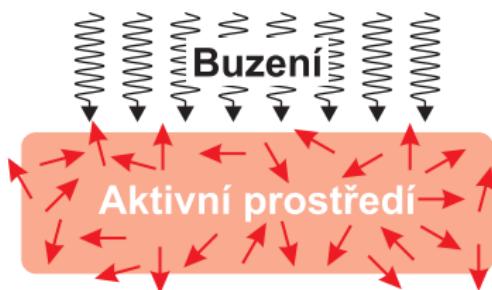
Laser a laserové záření

- Generátor (zesilovač) světla využívající *stimulované emise fotonů*
- Koherence, koncentrace energie (směr a čas), monochromatičnost



Základní elementy laseru

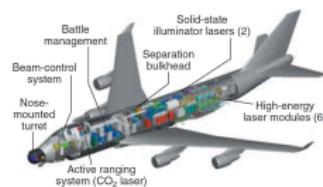
- Laserové aktivní prostředí
- Buzení (a chlazení)



Laser

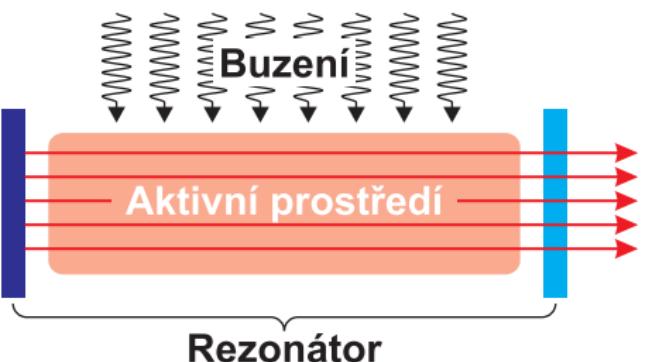
Laser a laserové záření

- ▶ Generátor (zesilovač) světla využívající *stimulované emise fotonů*
- ▶ Koherence, koncentrace energie (směr a čas), monochromatičnost



Základní elementy laseru

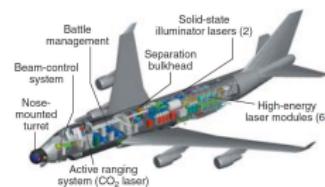
- ▶ Laserové aktivní prostředí
- ▶ Buzení (a chlazení)
- ▶ Rezonátor



Laser

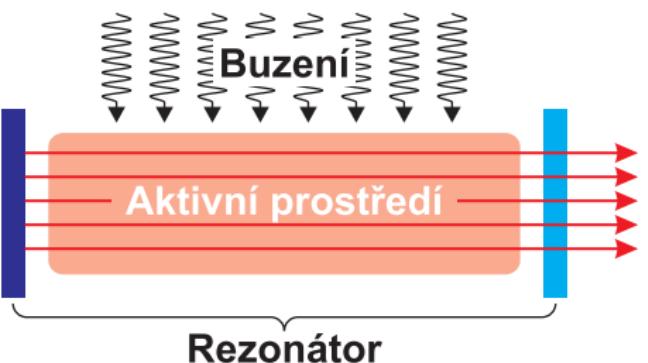
Laser a laserové záření

- Generátor (zesilovač) světla využívající *stimulované emise fotonů*
- Koherence, koncentrace energie (směr a čas), monochromatičnost

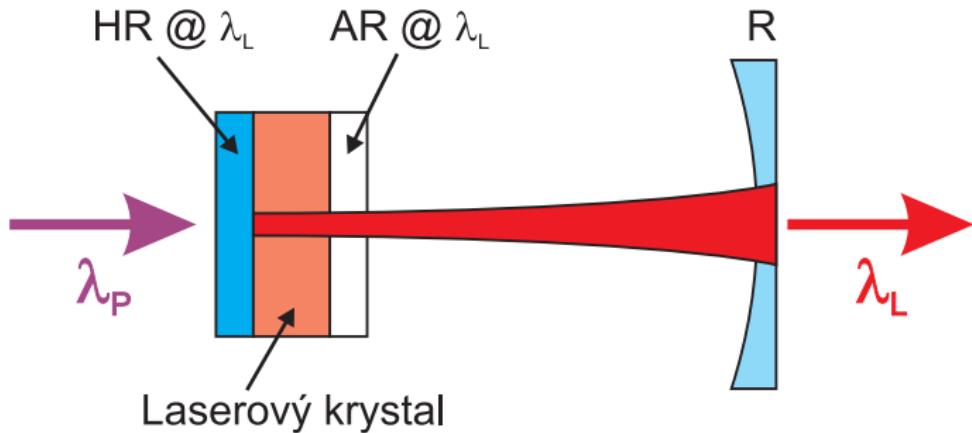


Základní elementy laseru

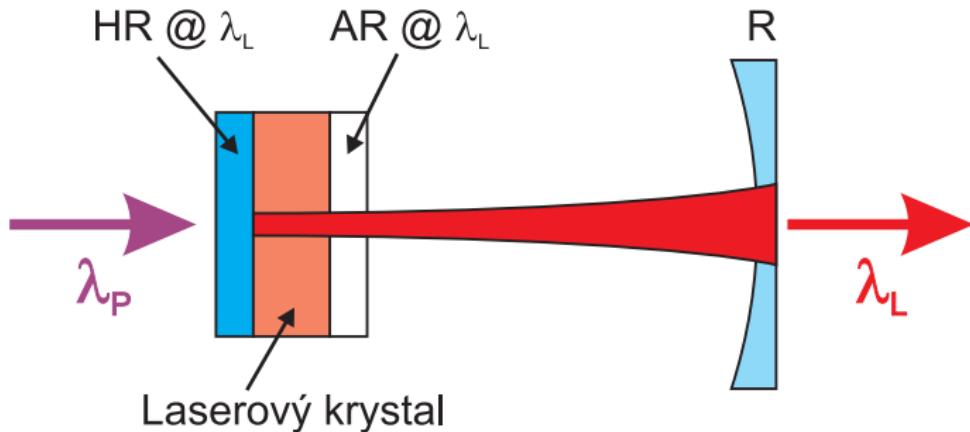
- Laserové aktivní prostředí
- Buzení (a chlazení)
- Rezonátor



Pevnolátkový diodově čerpaný laser

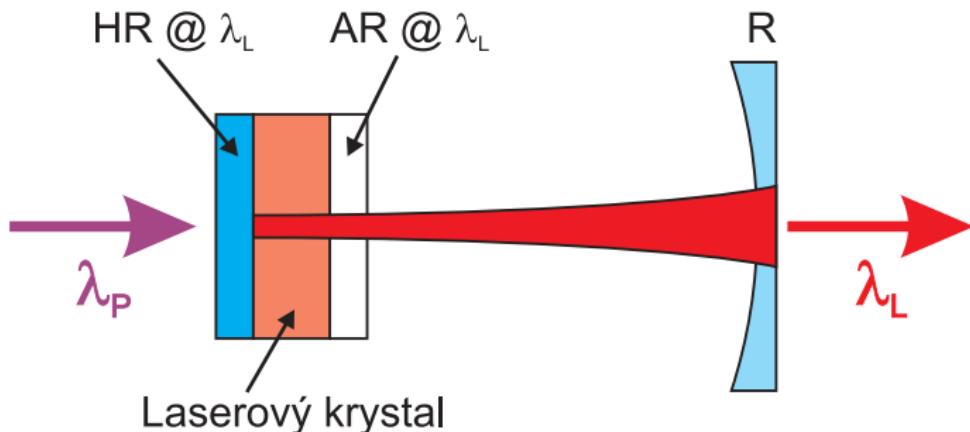


Pevnolátkový diodově čerpaný laser



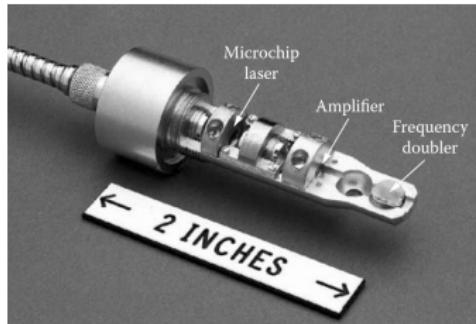
Pevnolátkový diodově čerpaný laser

Pevnolátkový diodově čerpaný laser

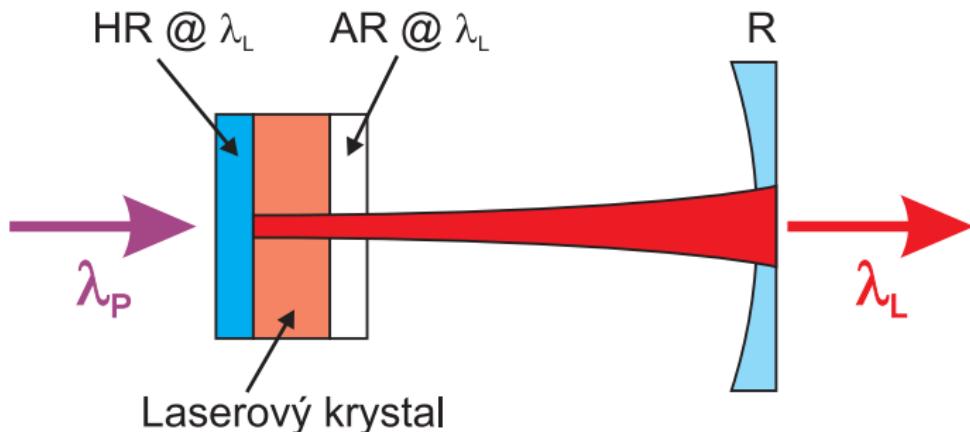


Pevnolátkový diodově čerpaný laser

- ▶ Kompaktní, robustní konstrukce

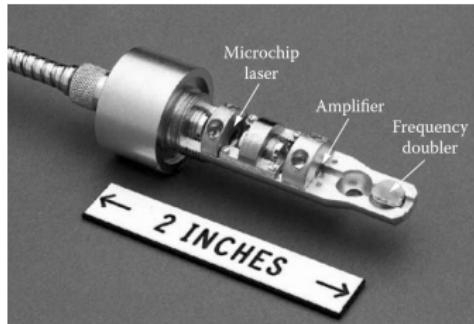


Pevnolátkový diodově čerpaný laser

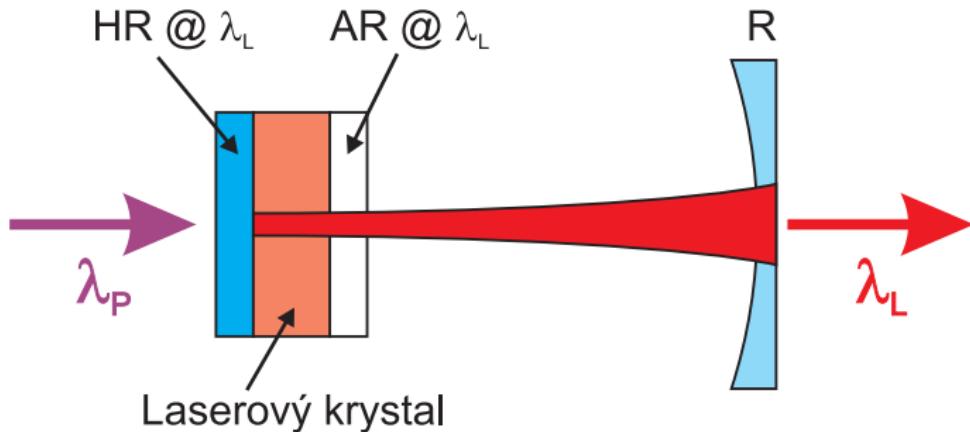


Pevnolátkový diodově čerpaný laser

- ▶ Kompaktní, robustní konstrukce
- ▶ Vysoká životnost a bezúdržbový chod

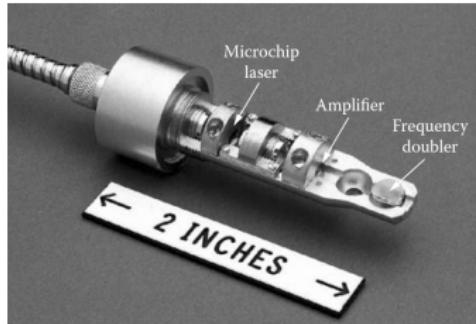


Pevnolátkový diodově čerpaný laser

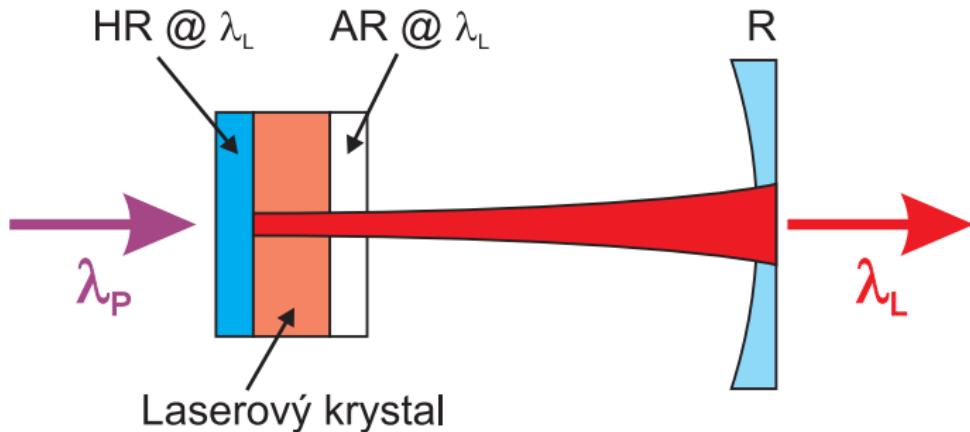


Pevnolátkový diodově čerpaný laser

- ▶ Kompaktní, robustní konstrukce
- ▶ Vysoká životnost a bezúdržbový chod
- ▶ Velká konverzní účinnost

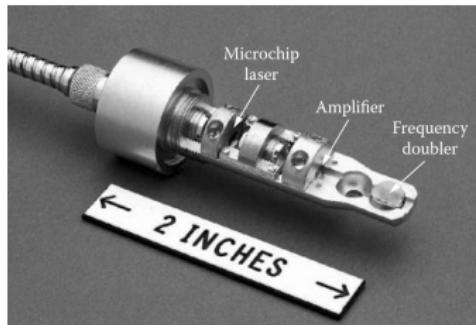


Pevnolátkový diodově čerpaný laser



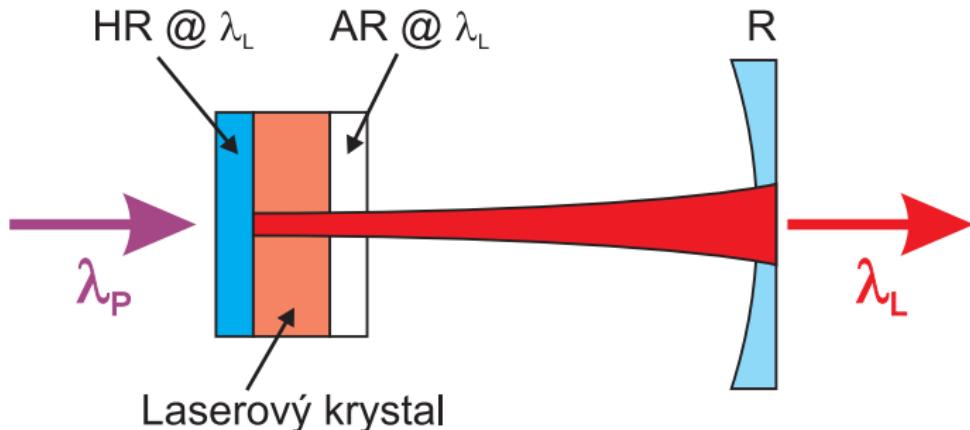
Pevnolátkový diodově čerpaný laser

- ▶ Kompaktní, robustní konstrukce
- ▶ Vysoká životnost a bezúdržbový chod
- ▶ Velká konverzní účinnost
- ▶ Kvalitní výstupní svazek (jas)



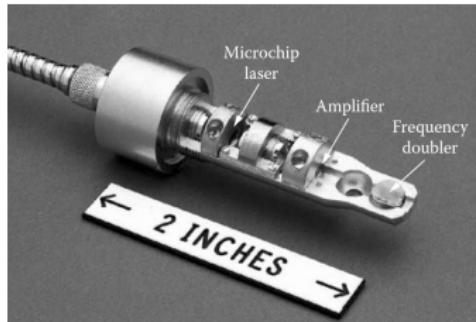
$$B = 100 \text{ TW/sr.cm}^2 \text{ (sun } \sim 1 \text{ kW/sr.cm}^2\text{)}$$

Pevnolátkový diodově čerpaný laser



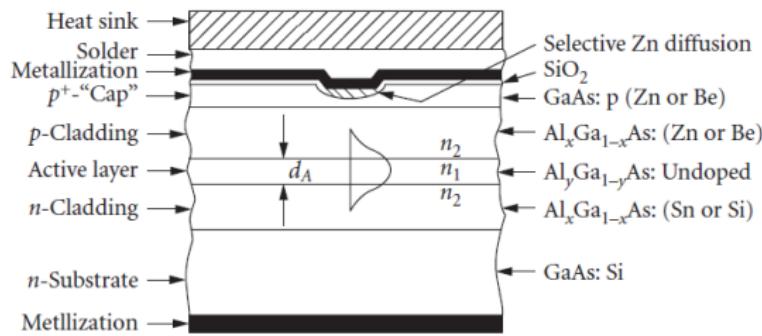
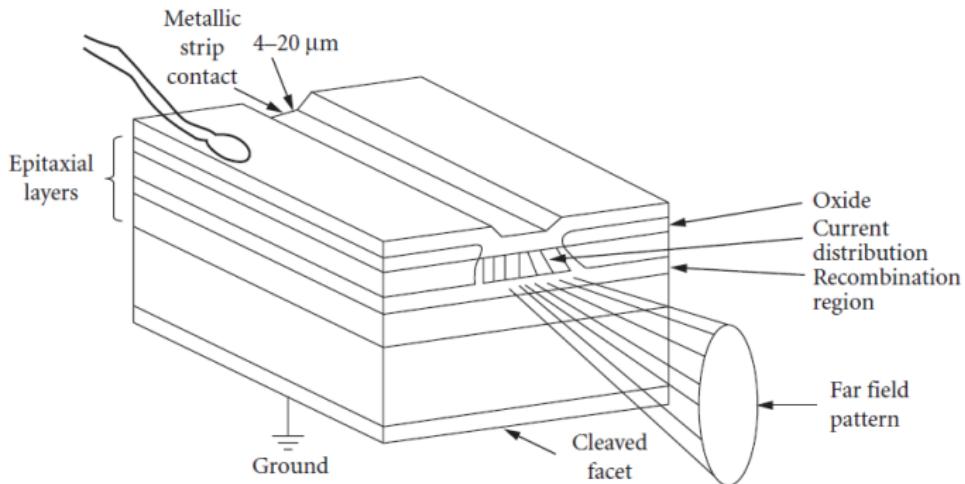
Pevnolátkový diodově čerpaný laser

- ▶ Kompaktní, robustní konstrukce
- ▶ Vysoká životnost a bezúdržbový chod
- ▶ Velká konverzní účinnost
- ▶ Kvalitní výstupní svazek (jas)
- ▶ Vysoký střední a špičkový výkon

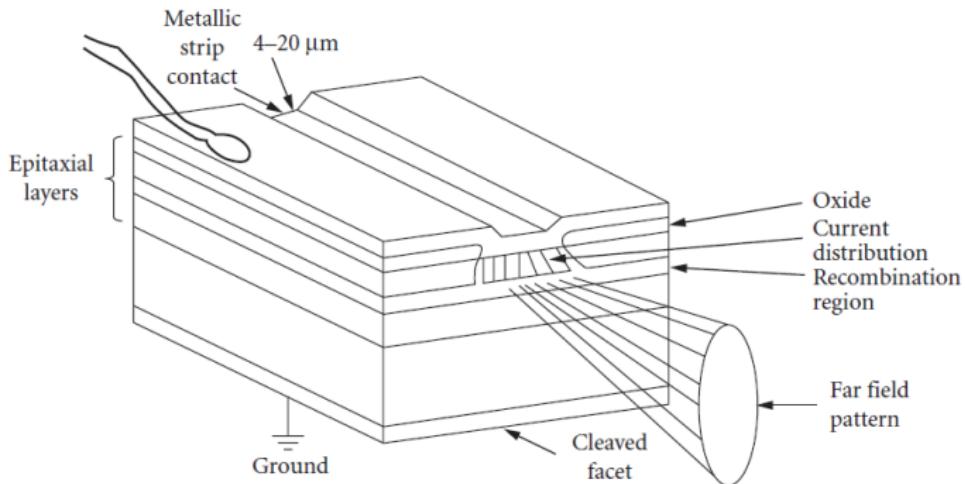


$$B = 100 \text{ TW/sr.cm}^2 \text{ (sun } \sim 1 \text{ kW/sr.cm}^2\text{)}$$

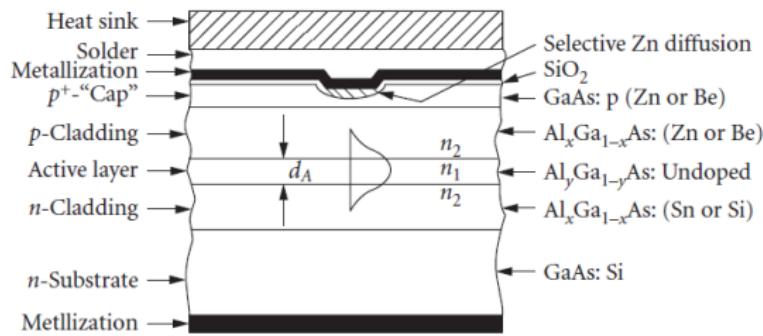
Čerpací laserová dioda



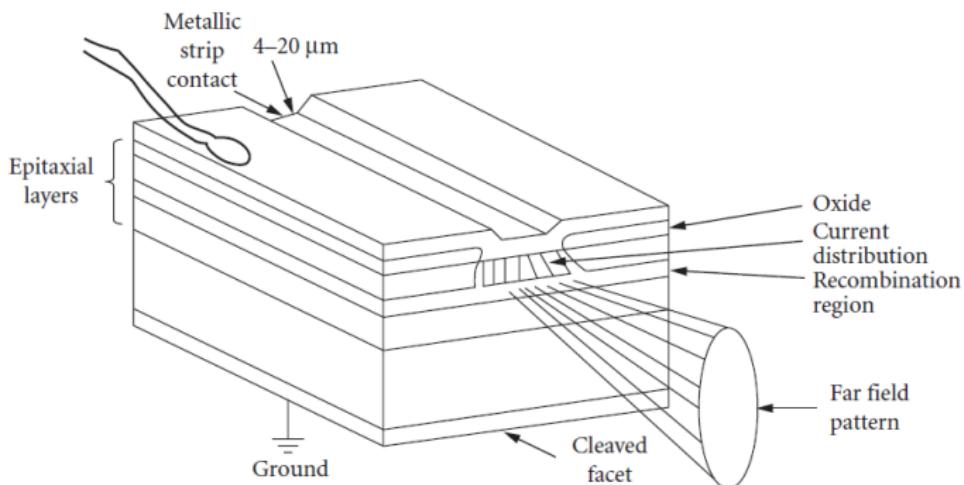
Čerpací laserová dioda



Polovodičový laser

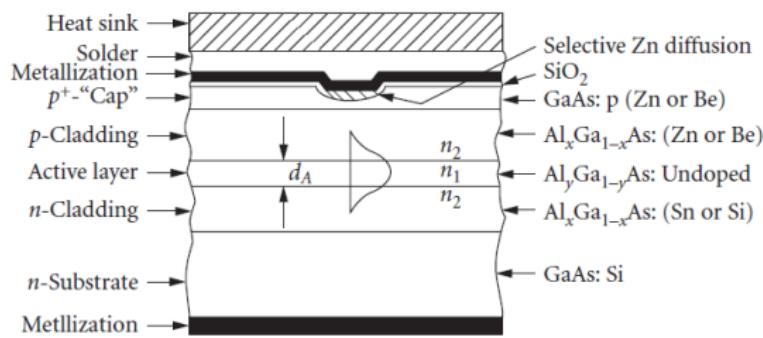


Čerpací laserová dioda

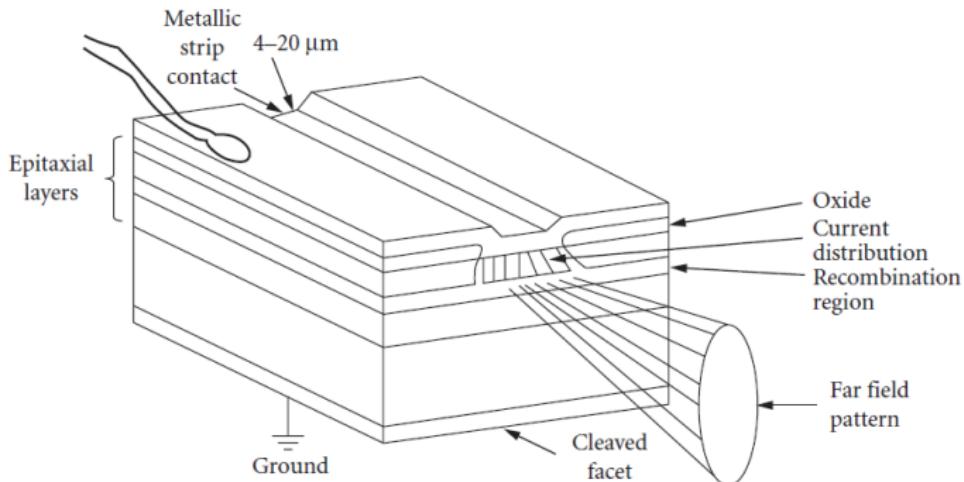


Polovodičový laser

► Vysoká účinnost

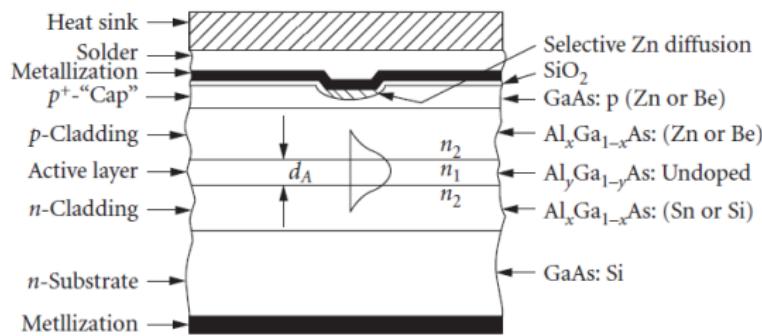


Čerpací laserová dioda

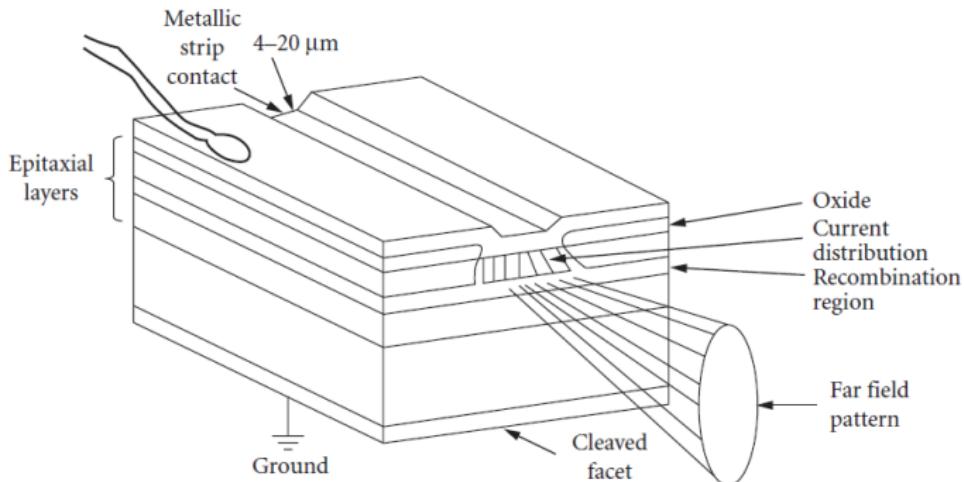


Polovodičový laser

- ▶ Vysoká účinnost
- ▶ Dlouhá životnost

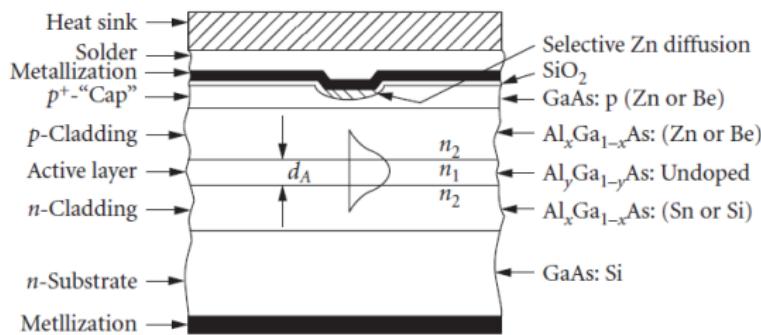


Čerpací laserová dioda

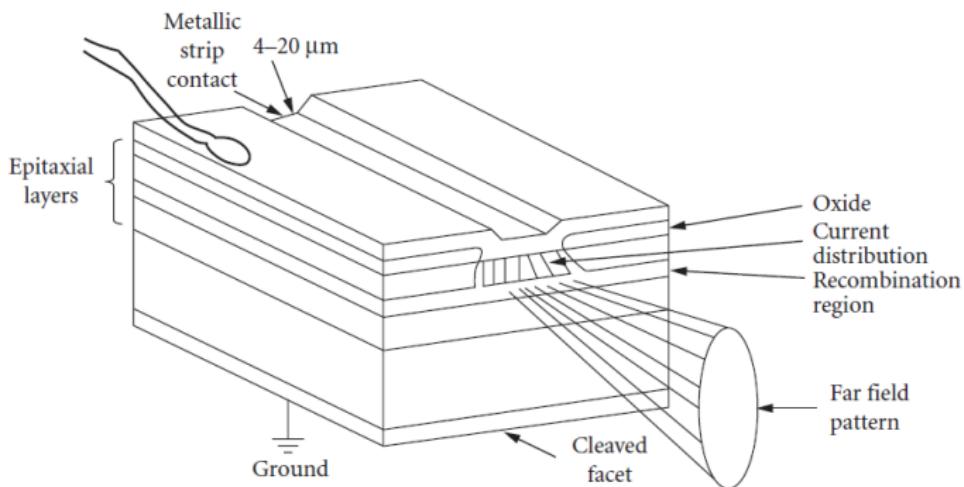


Polovodičový laser

- ▶ Vysoká účinnost
- ▶ Dlouhá životnost
- ▶ Nízká kvalita výstupního svazku

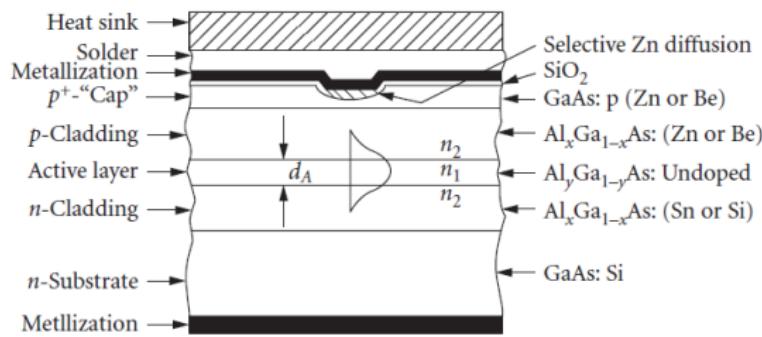


Čerpací laserová dioda

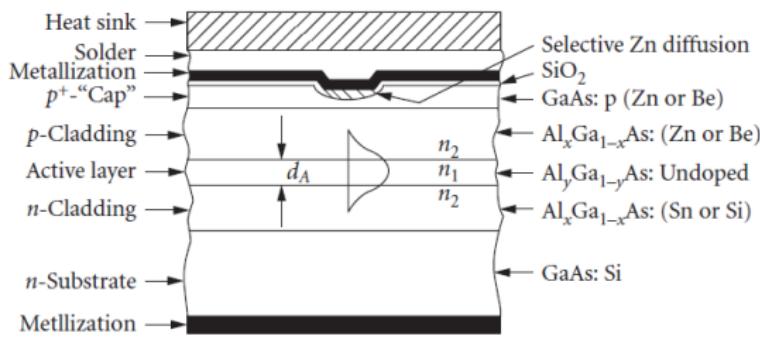
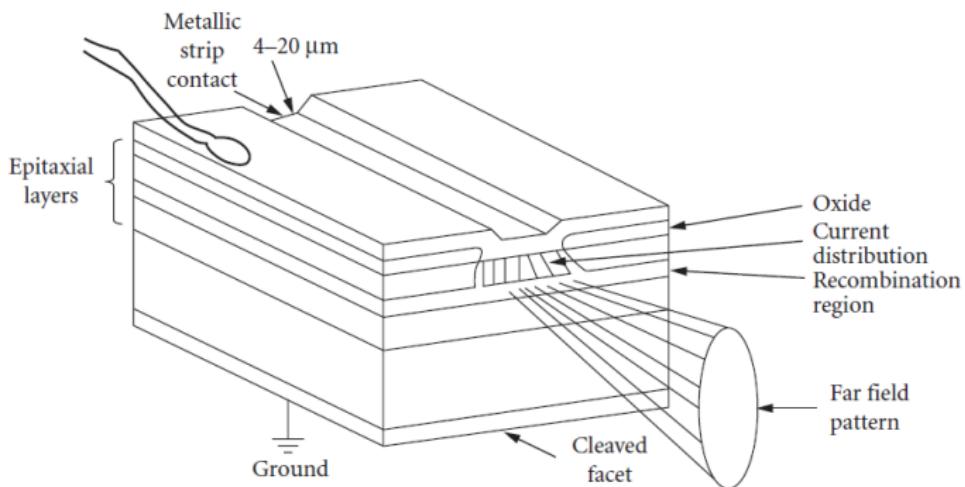


Polovodičový laser

- ▶ Vysoká účinnost
- ▶ Dlouhá životnost
- ▶ Nízká kvalita výstupního svazku
- ▶ Omezené spektrum



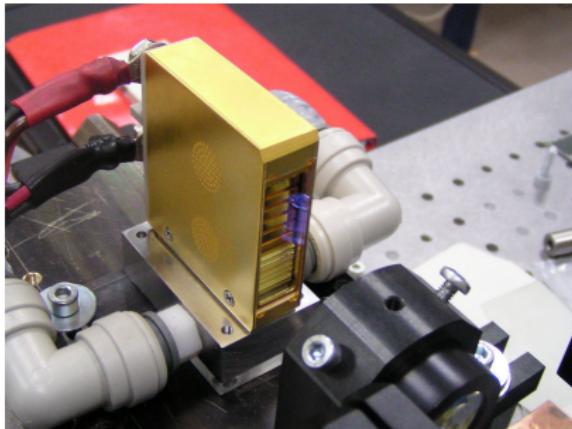
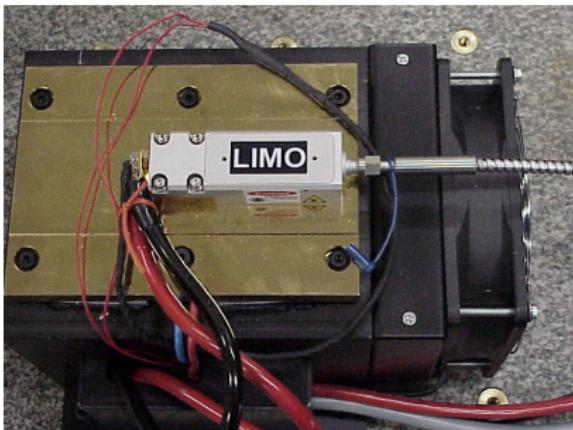
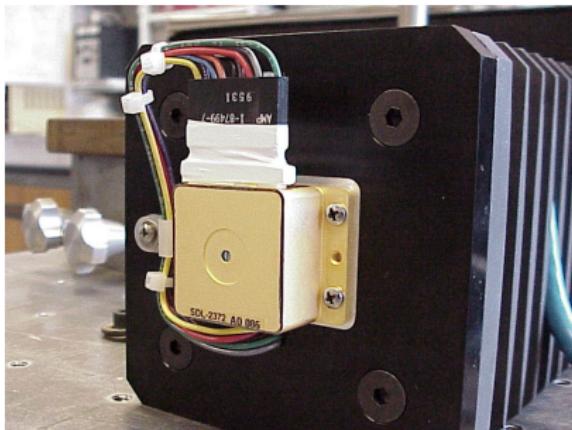
Čerpací laserová dioda



Polovodičový laser

- ▶ Vysoká účinnost
- ▶ Dlouhá životnost
- ▶ Nízká kvalita výstupního svazku
- ▶ Omezené spektrum
- ▶ Teplotně závislý výstup

Čerpací laserová dioda



Aktivní prostředí opticky čerpaného pevnolátkového laseru

Aktivní prostředí opticky čerpaného pevnolátkového laseru

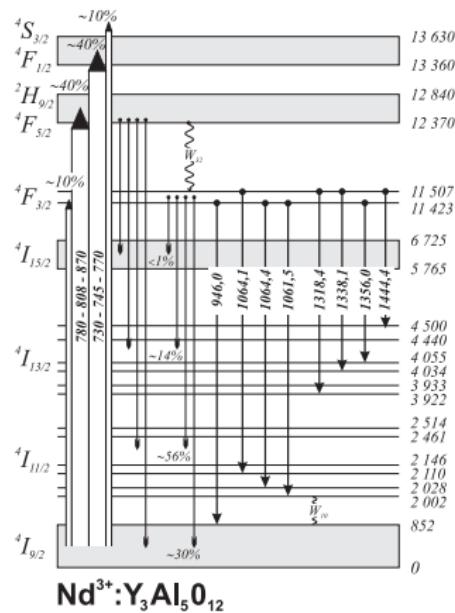
Iontový pevnolátkový laser

Iontový pevnolátkový laser

- ▶ Elektronové přechody iontové příměsi v transparentním izolátoru

Iontový pevnolátkový laser

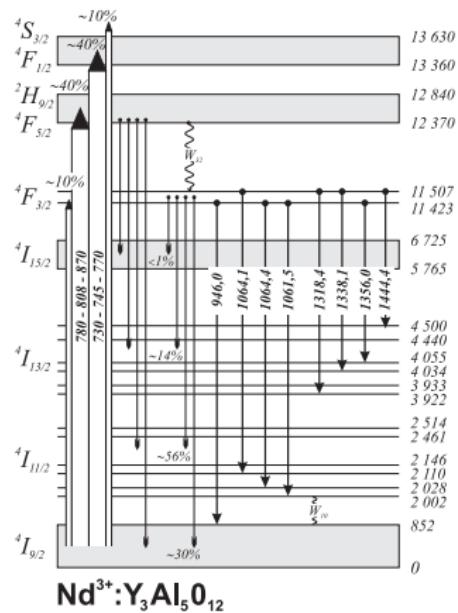
- ▶ Elektronové přechody iontové příměsi v transparentním izolátoru
- ▶ Kombinace aktivátor-matice určuje λ_L i λ_P



Aktivní prostředí opticky čerpaného pevnolátkového laseru

Iontový pevnolátkový laser

- ▶ Elektronové přechody iontové příměsi v transparentním izolátoru
- ▶ Kombinace aktivátor-matice určuje λ_L i λ_P

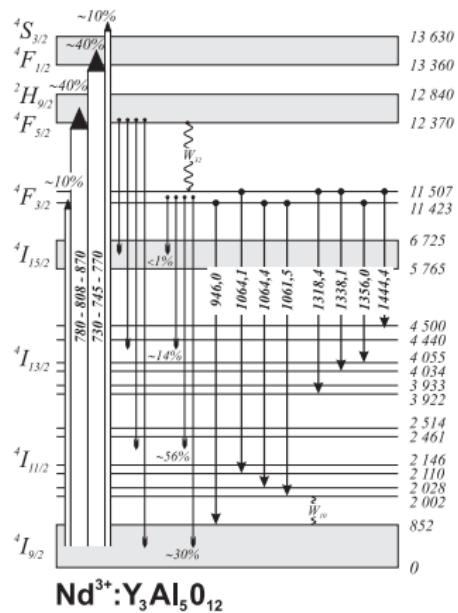


Opticky čerpaný polovodičový laser

Aktivní prostředí opticky čerpaného pevnolátkového laseru

Iontový pevnolátkový laser

- ▶ Elektronové přechody iontové příměsi v transparentním izolátoru
- ▶ Kombinace aktivátor-matice určuje λ_L i λ_P



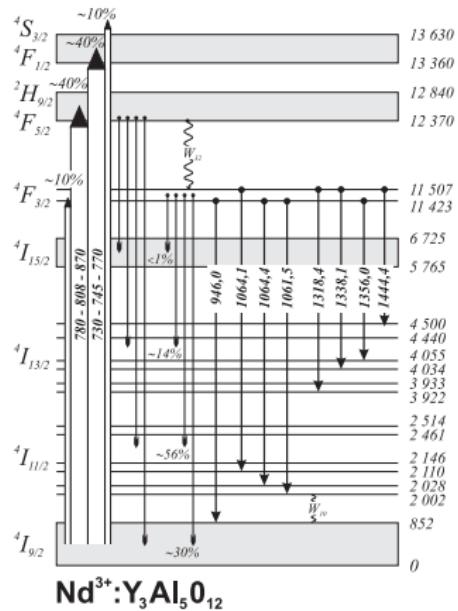
Opticky čerpaný polovodičový laser

- ▶ Přechody mezi hladinami kvantové jámy vytvořené v polovodiči

Aktivní prostředí opticky čerpaného pevnolátkového laseru

Iontový pevnolátkový laser

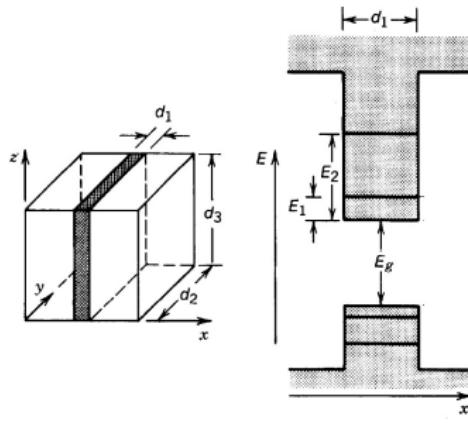
- ▶ Elektronové přechody iontové příměsi v transparentním izolátoru
- ▶ Kombinace aktivátor-matice určuje λ_L i λ_P



Opticky čerpaný polovodičový laser

- ▶ Přechody mezi hladinami kvantové jámy vytvořené v polovodiči
- ▶ Vzdálenost hladin (λ_L) lze ovlivnit šírkou kvantové jámy d

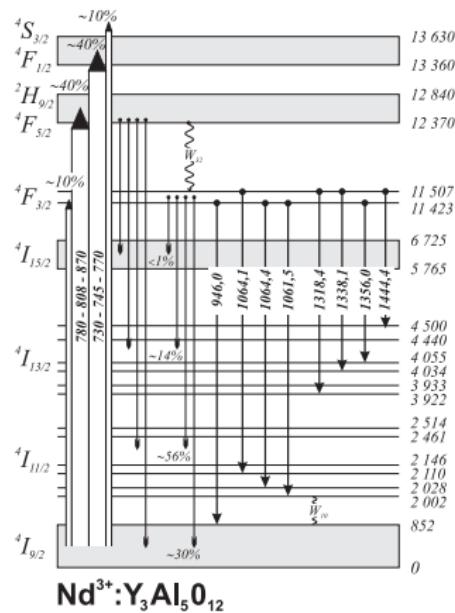
$$E_n = \frac{\hbar^2(n\pi/d)^2}{2m}, \quad n = 1, 2 \dots$$



Aktivní prostředí opticky čerpaného pevnolátkového laseru

Iontový pevnolátkový laser

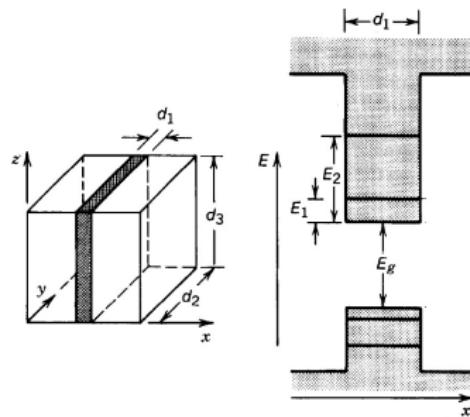
- ▶ Elektronové přechody iontové příměsi v transparentním izolátoru
- ▶ Kombinace aktivátor-matice určuje λ_L i λ_P



Opticky čerpaný polovodičový laser

- ▶ Přechody mezi hladinami kvantové jámy vytvořené v polovodiči
- ▶ Vzdálenost hladin (λ_L) lze ovlivnit šírkou kvantové jámy d

$$E_n = \frac{\hbar^2(n\pi/d)^2}{2m}, \quad n = 1, 2 \dots$$



- ▶ Mezní λ_L i λ_P určuje $\sim E_g$

Aktivátory pevnolátkových iontových laserů

1 H													2 He				
3 Li	4 Be																
11 Na	12 Mg																
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba	La- Lu	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra	Ac- Lr	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt									

57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr

Aktivátory pevnolátkových iontových laserů

1 H	Přímé čerpání LD												2 He				
3 Li	4 Be																
11 Na	12 Mg																
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba	La- Lu	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra	Ac- Lr	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt									

57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr

Aktivátory pevnolátkových iontových laserů

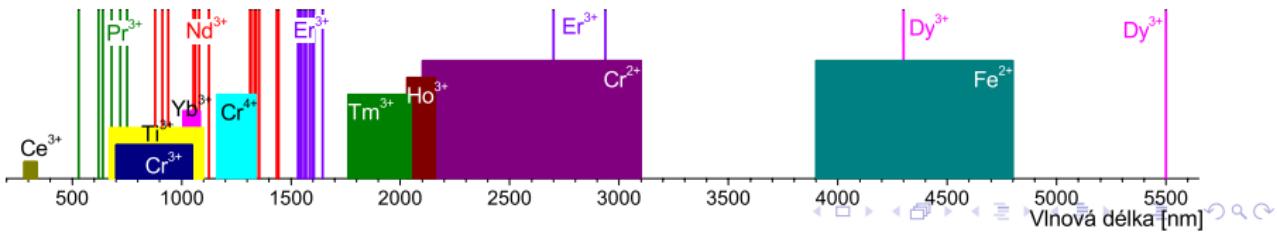
1 H											2 He						
3 Li	4 Be	 Přímé čerpání LD  Hybridní čerpání LD															
11 Na	12 Mg																
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba	La- Lu	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra	Ac- Lr	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt									

57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr

Aktivátory pevnolátkových iontových laserů

1 H		Přímé čerpání LD										2 He	
3 Li	4 Be												
11 Na	12 Mg												
19 K	20 Ca	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	
		Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	
												Sn	
55 Cs	56 Ba	La-	72 Lu	73 Hf	74 Ta	75 W	76 Re	77 Os	78 Ir	79 Pt	80 Au	81 Hg	82 Tl
												Pb	
87 Fr	88 Ra	Ac-	104 Lr	105 Rf	106 Db	107 Sg	108 Bh	109 Hs					Bi
													Po
													At
													Rn

57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr



Ionty ve vnějším poli matrice

Ionty ve vnějším poli matrice

Ionty vzácných zemin

Ionty ve vnějším poli matrice

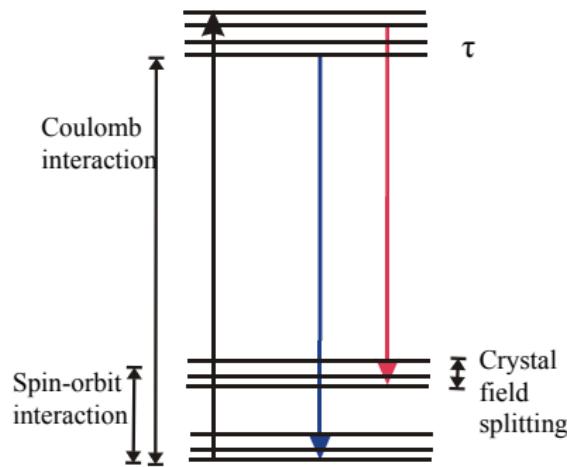
Ionty vzácných zemin

- ▶ Valenční $4f$ elektrony stíní elektrony z podslupek $5s$ a $5p$, které mají menší energii, ale větší poloměr

Ionty ve vnějším poli matrice

Ionty vzácných zemin

- ▶ Valenční $4f$ elektrony stíní elektrony z podslupek $5s$ a $5p$, které mají menší energii, ale větší poloměr
- ▶ Slabá interakce s vnějším polem \Rightarrow úzké emisní a absorpcní čáry

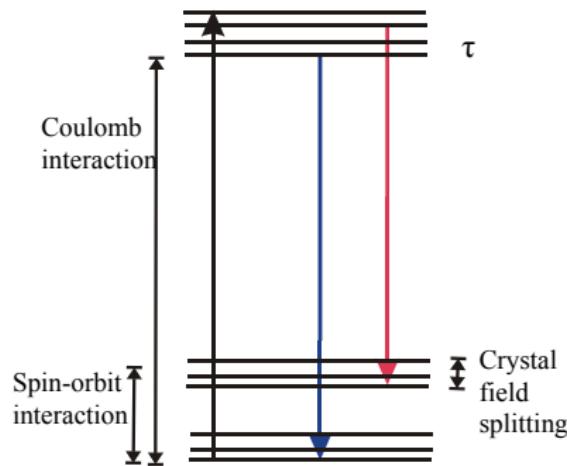


Ionty ve vnějším poli matrice

Ionty vzácných zemin

- ▶ Valenční $4f$ elektrony stíní elektrony z podslupek $5s$ a $5p$, které mají menší energii, ale větší poloměr
- ▶ Slabá interakce s vnějším polem \Rightarrow úzké emisní a absorpcní čáry

Ionty přechodových prvků



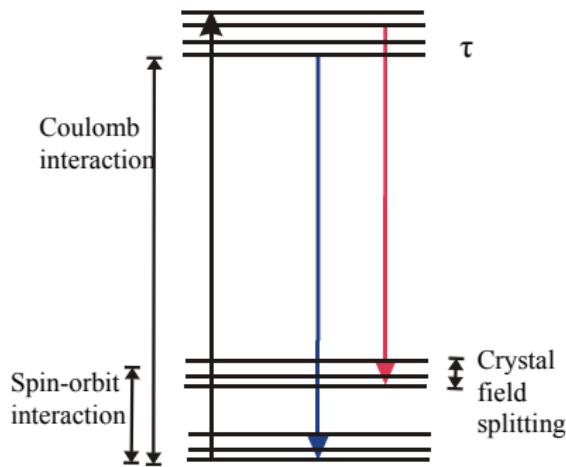
Ionty ve vnějším poli matrice

Ionty vzácných zemin

- ▶ Valenční $4f$ elektrony stíní elektrony z podslupek $5s$ a $5p$, které mají menší energii, ale větší poloměr
- ▶ Slabá interakce s vnějším polem \Rightarrow úzké emisní a absorpcní čáry

Ionty přechodových prvků

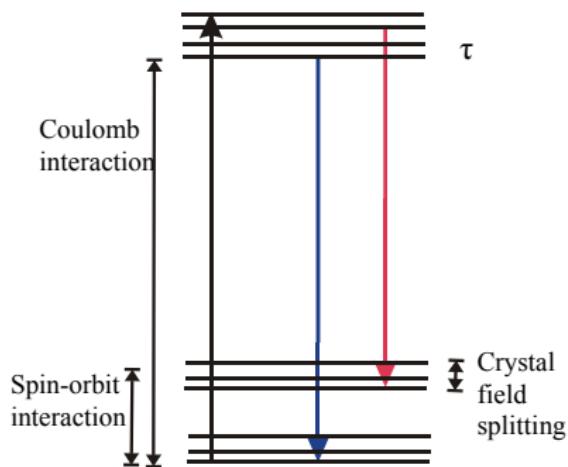
- ▶ Valenční elektrony v podslupce $3d$ na vnějším okraji elektronového obalu jsou v přímé interakci s okolím



Ionty ve vnějším poli matrice

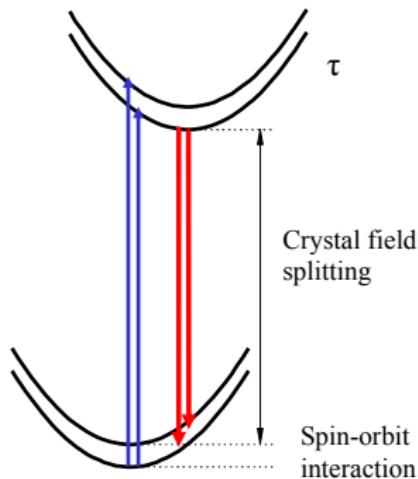
Ionty vzácných zemin

- ▶ Valenční $4f$ elektrony stíňí elektrony z podslupek $5s$ a $5p$, které mají menší energii, ale větší poloměr
- ▶ Slabá interakce s vnějším polem \Rightarrow úzké emisní a absorpční čáry



Ionty přechodových prvků

- ▶ Valenční elektrony v podslupce $3d$ na vnějším okraji elektronového obalu jsou v přímé interakci s okolím
- ▶ Silná interakce s fonony – široké absorpční a emisní čáry



Yb:YAG

c = 10 % Yb/Y

L = 3 mm

D = 3 mm

Cr:YAG

To = 75 %

L = 2.8 mm

D = 3 mm



Roc = 80 %



1 mm

Matrice pevnolátkových iontových laserů

Monokrystaly

Matrice pevnolátkových iontových laserů

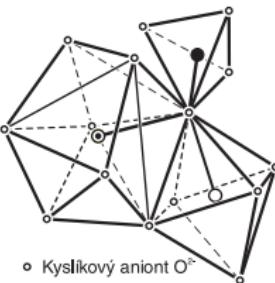
Monokrystaly

- ▶ ~ 230 krystalů (oxidy a fluoridy)

Matrice pevnolátkových iontových laserů

Monokrystaly

- ▶ ~ 230 krytalů (oxidy a fluoridy)
- ▶ Uspořádáním a symetrií



Pozice ◎ dodekaedru

Pr³⁺ (laser)
Nd³⁺ (laser)

Ho³⁺ (laser)
Er³⁺ (laser)

Tm³⁺ (laser)
Yb³⁺ (laser)

Pozice ○ oktaedru

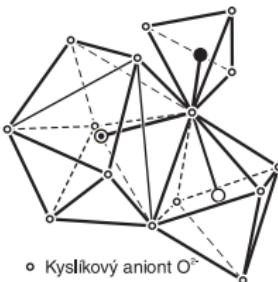
Cr³⁺
Ti³⁺
V³⁺ (Q-spínač)

Pozice ● tetraedru
Cr⁴⁺ (laser)

Matrice pevnolátkových iontových laserů

Monokrystaly

- ▶ ~ 230 krystalů (oxidy a fluoridy)
- ▶ Uspořádáním a symetrií
- ▶ Mechanické a tepelné vlastnosti



Pozice ◻
dodekaedru

Pr³⁺ (laser)
Nd³⁺ (laser)

Ho³⁺ (laser)
Er³⁺ (laser)

Tm³⁺ (laser)
Yb³⁺ (laser)

Pozice ◇
oktaedru

Cr³⁺
Ti³⁺

V³⁺ (Q-spínač)

Pozice ●
tetraedru

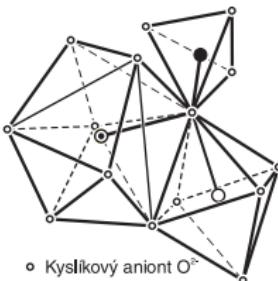
Cr⁴⁺

Matrice pevnolátkových iontových laserů

Monokrystaly

- ▶ ~ 230 krystalů (oxidy a fluoridy)
- ▶ Uspořádáním a symetrií
- ▶ Mechanické a tepelné vlastnosti

Skla



Pozice ◎
dodekaedru

Pr³⁺ (laser)
Nd³⁺ (laser)

Ho³⁺ (laser)
Er³⁺ (laser)

Tm³⁺ (laser)
Yb³⁺ (laser)

Pozice ○
oktaedru

Cr³⁺
Ti³⁺

V³⁺ (Q-spínač)

Pozice ●
tetraedru

Cr⁴⁺

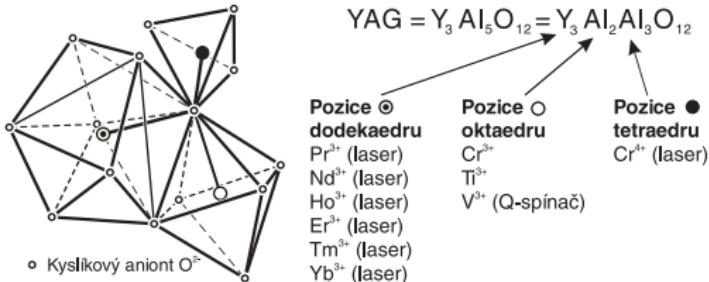
Matrice pevnolátkových iontových laserů

Monokrystaly

- ▶ ~ 230 krystalů (oxidy a fluoridy)
- ▶ Uspořádáním a symetrií
- ▶ Mechanické a tepelné vlastnosti

Skla

- ▶ Homogenita, rozměry a čistota



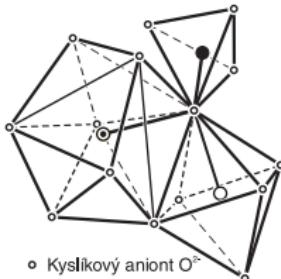
Matrice pevnolátkových iontových laserů

Monokrystaly

- ▶ ~ 230 krystralů (oxidy a fluoridy)
- ▶ Uspořádáním a symetrií
- ▶ Mechanické a tepelné vlastnosti

Skla

- ▶ Homogenita, rozměry a čistota
- ▶ Nízká tepelná vodivost



Pozice ◎
dodekaedru

Pr³⁺ (laser)
Nd³⁺ (laser)
Ho³⁺ (laser)
Er³⁺ (laser)
Tm³⁺ (laser)
Yb³⁺ (laser)

Pozice ○
oktaedru

Cr³⁺
Ti³⁺
V³⁺ (Q-spínač)

Pozice ●
tetraedru

Cr⁴⁺ (laser)

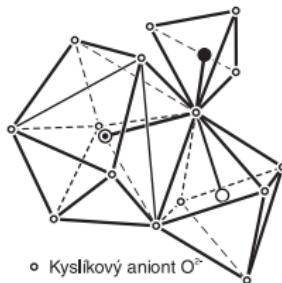
Matrice pevnolátkových iontových laserů

Monokrystaly

- ▶ ~ 230 krystalů (oxidy a fluoridy)
- ▶ Uspořádáním a symetrií
- ▶ Mechanické a tepelné vlastnosti

Skla

- ▶ Homogenita, rozměry a čistota
- ▶ Nízká tepelná vodivost
- ▶ Optická vlákna



Pozice ◎
dodekaedru

Pr³⁺ (laser)
Nd³⁺ (laser)
Ho³⁺ (laser)
Er³⁺ (laser)
Tm³⁺ (laser)
Yb³⁺ (laser)

Pozice ○
oktaedru

Cr³⁺
Ti³⁺
V³⁺ (Q-spínač)

Pozice ●
tetraedru
Cr⁴⁺ (laser)

Matrice pevnolátkových iontových laserů

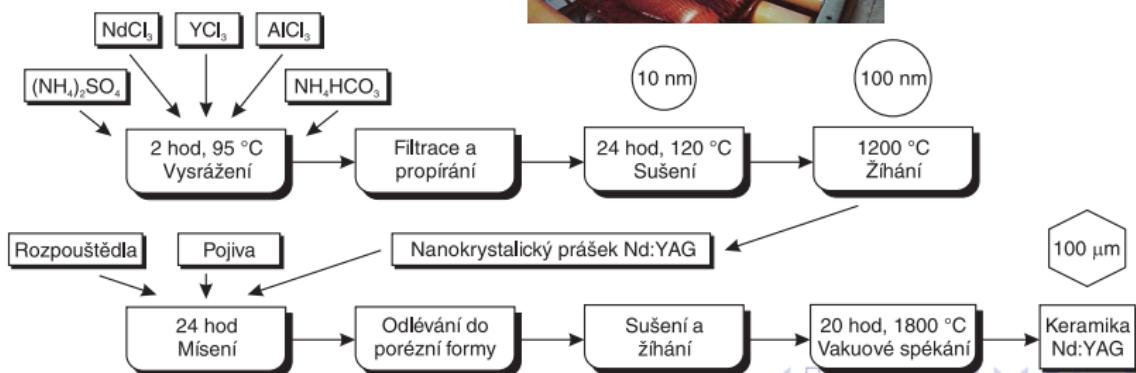
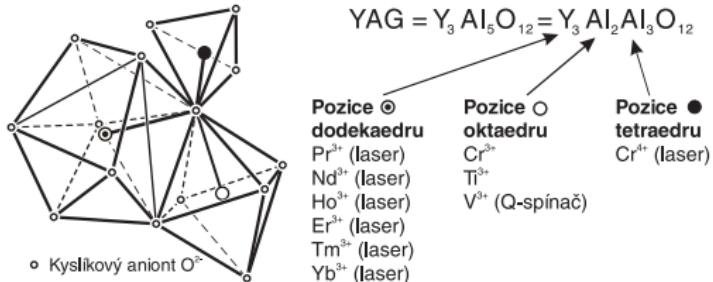
Monokrystaly

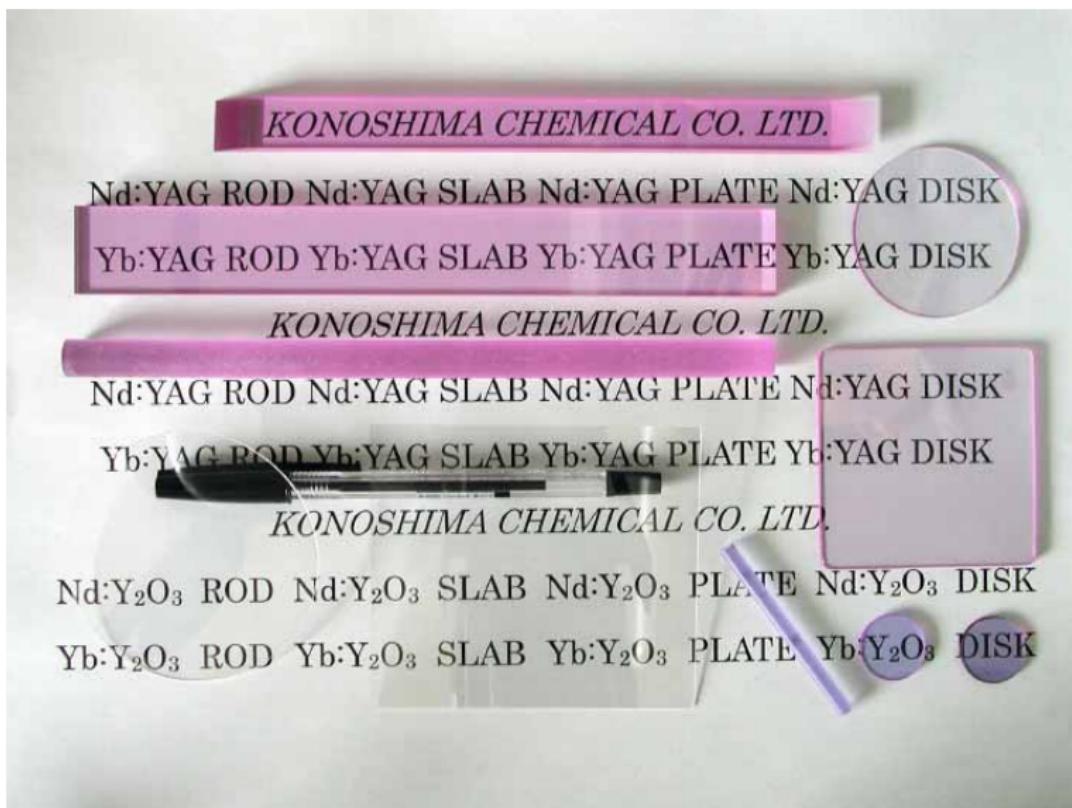
- ~ 230 krytalů (oxidy a fluoridy)
- Uspořádáním a symetrií
- Mechanické a tepelné vlastnosti

Skla

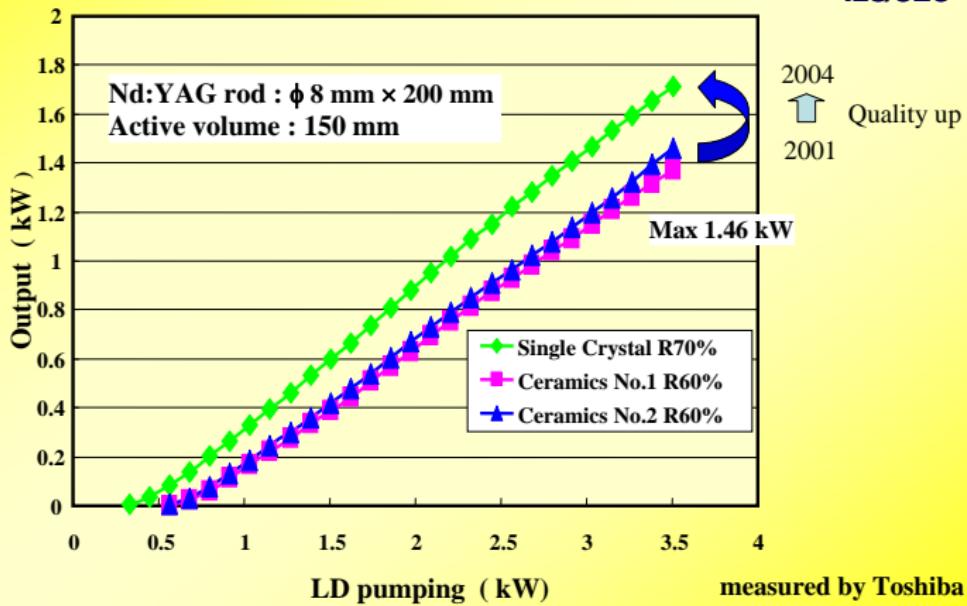
- Homogenita, rozměry a čistota
- Nízká tepelná vodivost
- Optická vlákna

Transparentní keramika

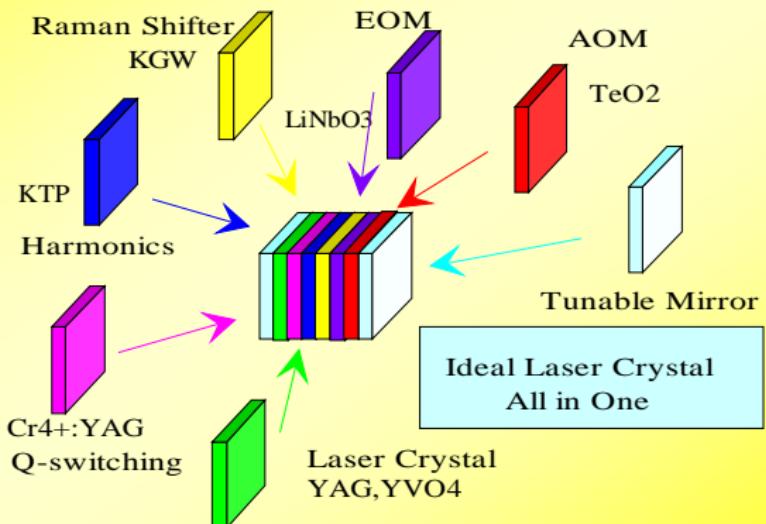




kW-class output of ceramic YAG laser



What is the ideal laser crystals?



Round Table Discussion in MPLP 1997

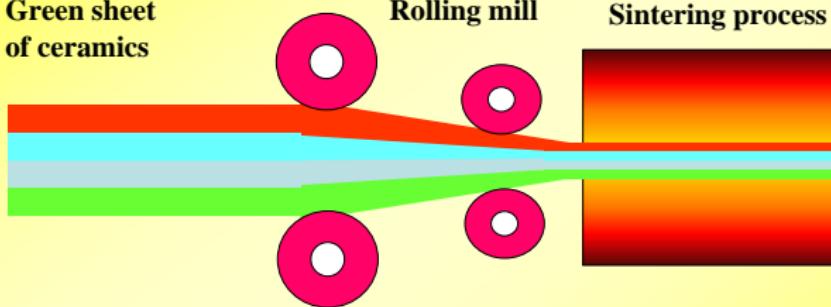
Future of Ceramic Laser Production

ILS/UUC

Green sheet
of ceramics

Rolling mill

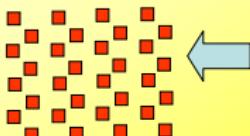
Sintering process



Multi Layered Ceramic Lasers can
be fabricated by **Printing Machine**

Multi-functional ceramic laser elements

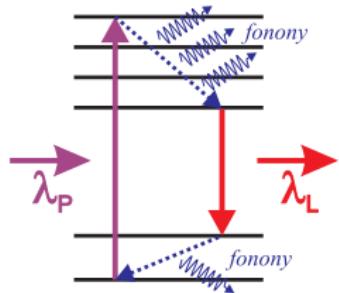
Laser cutting



Generace tepla v aktivním prostředí

Zdroje tepla

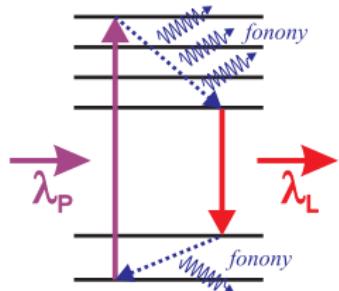
Zdroje tepla



► Kvantový defekt

$$\eta_{QD} = 1 - \frac{E_{\text{Laser}}}{E_{\text{Pump}}} = 1 - \frac{\lambda_P}{\lambda_L}$$

Zdroje tepla

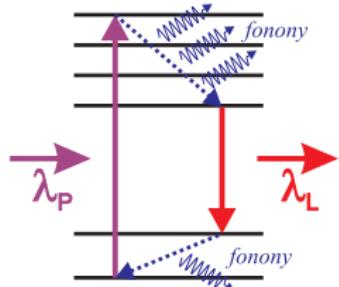


- ▶ Kvantový defekt

$$\eta_{QD} = 1 - \frac{E_{\text{Laser}}}{E_{\text{Pump}}} = 1 - \frac{\lambda_P}{\lambda_L}$$

- ▶ Zdroje tepla = fonony = $E_{\text{Pump}} - E_{\text{Laser}}$

Zdroje tepla



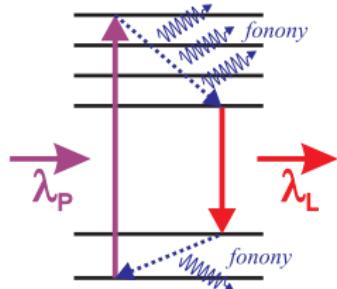
- Kvantový defekt

$$\eta_{QD} = 1 - \frac{E_{\text{Laser}}}{E_{\text{Pump}}} = 1 - \frac{\lambda_P}{\lambda_L}$$

- Zdroje tepla = fonony = $E_{\text{Pump}} - E_{\text{Laser}}$
- Tepelný příkon = absorbovaný čerpací výkon $\times \eta_{QD}$

Generace tepla v aktivním prostředí

Zdroje tepla

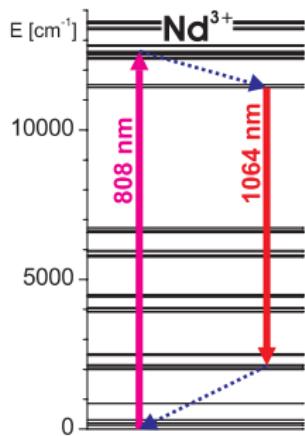


- Kvantový defekt

$$\eta_{QD} = 1 - \frac{E_{\text{Laser}}}{E_{\text{Pump}}} = 1 - \frac{\lambda_P}{\lambda_L}$$

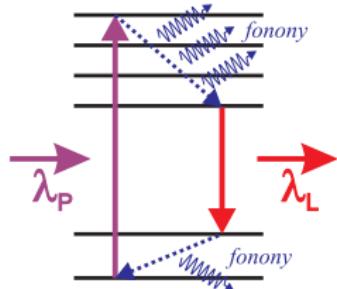
- Zdroje tepla = fonony = $E_{\text{Pump}} - E_{\text{Laser}}$
- Tepelný příkon = absorbovaný čerpací výkon $\times \eta_{QD}$

Nd:YAG ($\eta_{QD} = 24\%$)



Generace tepla v aktivním prostředí

Zdroje tepla

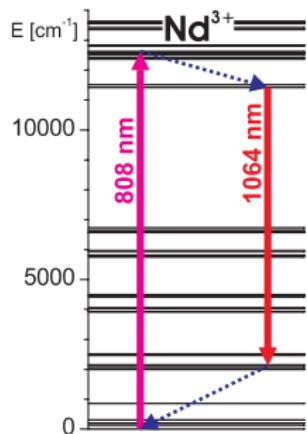


- Kvantový defekt

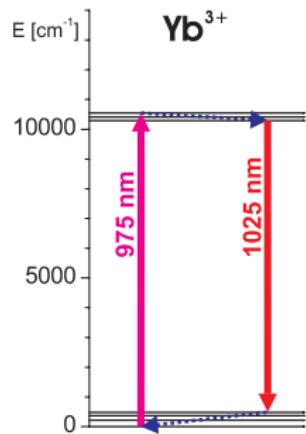
$$\eta_{QD} = 1 - \frac{E_{\text{Laser}}}{E_{\text{Pump}}} = 1 - \frac{\lambda_P}{\lambda_L}$$

- Zdroje tepla = fonony = $E_{\text{Pump}} - E_{\text{Laser}}$
- Tepelný příkon = absorbovaný čerpací výkon $\times \eta_{QD}$

Nd:YAG ($\eta_{QD} = 24\%$)

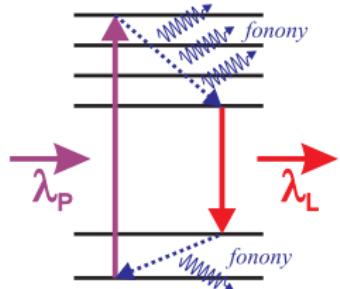


Yb:CaF₂ ($\eta_{QD} = 5\%$)



Generace tepla v aktivním prostředí

Zdroje tepla

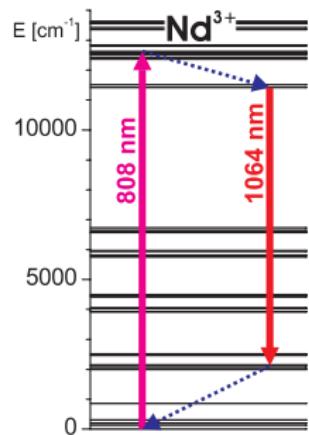


► Kvantový defekt

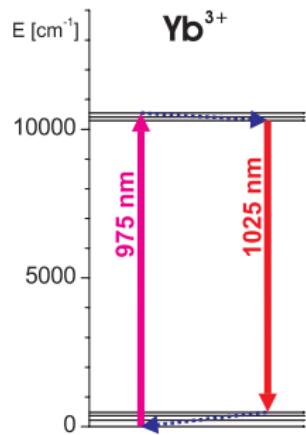
$$\eta_{QD} = 1 - \frac{E_{\text{Laser}}}{E_{\text{Pump}}} = 1 - \frac{\lambda_P}{\lambda_L}$$

- Zdroje tepla = fonony = $E_{\text{Pump}} - E_{\text{Laser}}$
- Tepelný příkon = absorbovaný čerpací výkon $\times \eta_{QD}$

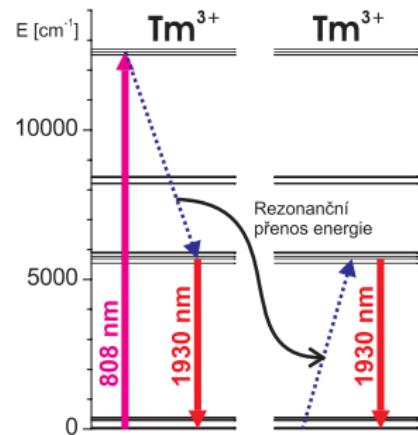
Nd:YAG ($\eta_{QD} = 24\%$)



Yb:CaF₂ ($\eta_{QD} = 5\%$)



Tm:GdVO₄ ($\eta_{QD} = 20\%$)



Působení a odvod tepla

Působení tepla v aktivním prostředí

Působení tepla v aktivním prostředí

- ▶ Modulace indexu lomu, gradient teploty \Rightarrow tepelná čočka + aberace \Rightarrow stabilita rezonátoru a kvalita svazku

Působení tepla v aktivním prostředí

- ▶ Modulace indexu lomu, gradient teploty \Rightarrow tepelná čočka + aberace \Rightarrow stabilita rezonátoru a kvalita svazku
- ▶ Tepelné pnutí \Rightarrow teplem indukovaný dvojlom (depolarizační ztráty), mechanické poškození AP

Působení tepla v aktivním prostředí

- ▶ Modulace indexu lomu, gradient teploty \Rightarrow tepelná čočka + aberace \Rightarrow stabilita rezonátoru a kvalita svazku
- ▶ Tepelné pnutí \Rightarrow teplem indukovaný dvojlom (depolarizační ztráty), mechanické poškození AP
- ▶ Změna populace hladin \Rightarrow změna absorpce, fluorescenční doba

Působení tepla v aktivním prostředí

- ▶ Modulace indexu lomu, gradient teploty \Rightarrow tepelná čočka + aberace \Rightarrow stabilita rezonátoru a kvalita svazku
- ▶ Tepelné pnutí \Rightarrow teplem indukovaný dvojlom (depolarizační ztráty), mechanické poškození AP
- ▶ Změna populace hladin \Rightarrow změna absorpce, fluorescenční doba

Zlepšení odvodu tepla z aktivního prostředí

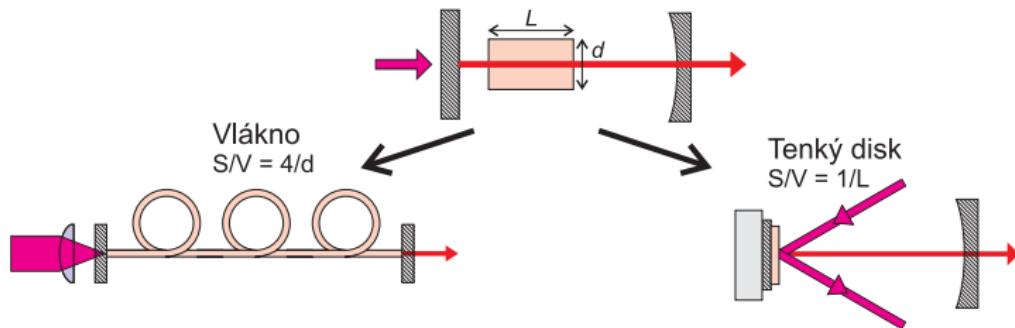
Působení a odvod tepla

Působení tepla v aktivním prostředí

- ▶ Modulace indexu lomu, gradient teploty \Rightarrow tepelná čočka + aberace \Rightarrow stabilita rezonátoru a kvalita svazku
- ▶ Tepelné pnutí \Rightarrow teplem indukovaný dvojlam (depolarizační ztráty), mechanické poškození AP
- ▶ Změna populace hladin \Rightarrow změna absorpce, fluorescenční doba

Zlepšení odvodu tepla z aktivního prostředí

- ▶ Zvětšení poměru chladící plocha – objem AP



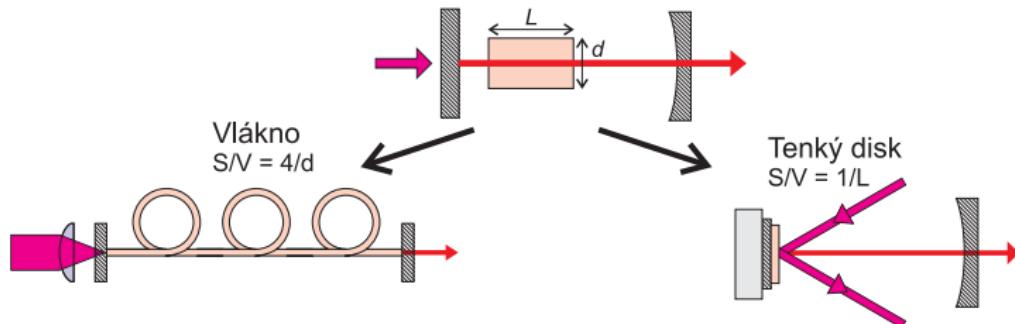
Působení a odvod tepla

Působení tepla v aktivním prostředí

- ▶ Modulace indexu lomu, gradient teploty \Rightarrow tepelná čočka + aberace \Rightarrow stabilita rezonátoru a kvalita svazku
- ▶ Tepelné pnutí \Rightarrow teplem indukovaný dvojlam (depolarizační ztráty), mechanické poškození AP
- ▶ Změna populace hladin \Rightarrow změna absorpce, fluorescenční doba

Zlepšení odvodu tepla z aktivního prostředí

- ▶ Zvětšení poměru chladící plocha – objem AP



- ▶ Kryogenní chlazení \Rightarrow vzroste tepelná vodivost, klesne dn_{ref}/dT a roztažnost

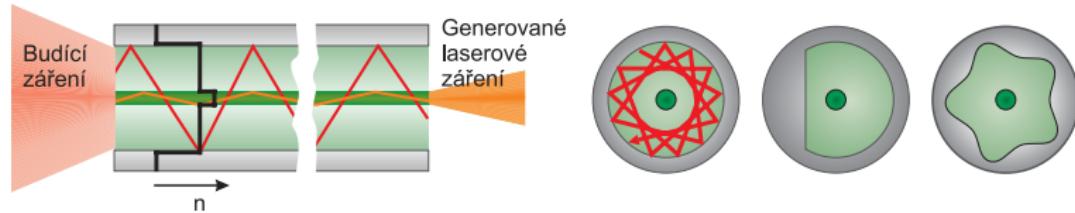
Vláknový laser

Buzení jádra s dvojitým pláštěm

Vláknový laser

Buzení jádra s dvojitým pláštěm

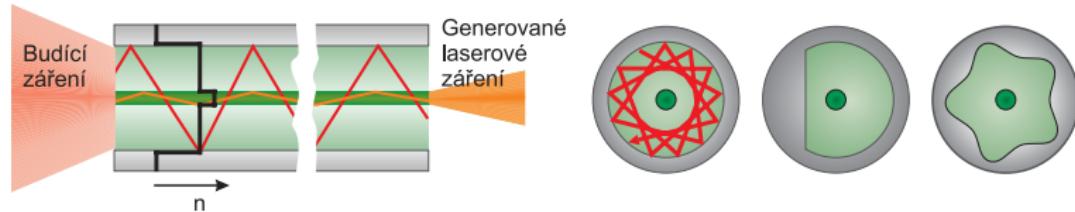
- Mnohamódový budící svazek se navádí do pláště $\varnothing 100 - 1000 \mu\text{m}$, jednomodové generované záření se šíří jádrem $\varnothing 10 - 500 \mu\text{m}$



Vláknový laser

Buzení jádra s dvojitým pláštěm

- Mnohamódový budící svazek se navádí do pláště $\varnothing 100 - 1000 \mu\text{m}$, jednomodové generované záření se šíří jádrem $\varnothing 10 - 500 \mu\text{m}$

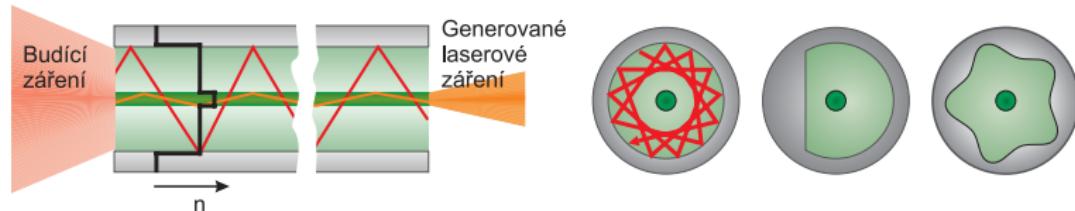


Vláknový laser

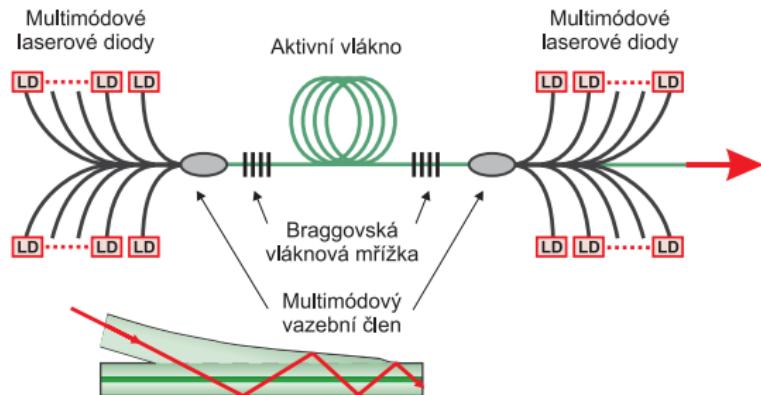
Vláknový laser

Buzení jádra s dvojitým pláštěm

- Mnohamódový budící svazek se navádí do pláště $\varnothing 100 - 1000 \mu\text{m}$, jednomodové generované záření se šíří jádrem $\varnothing 10 - 500 \mu\text{m}$



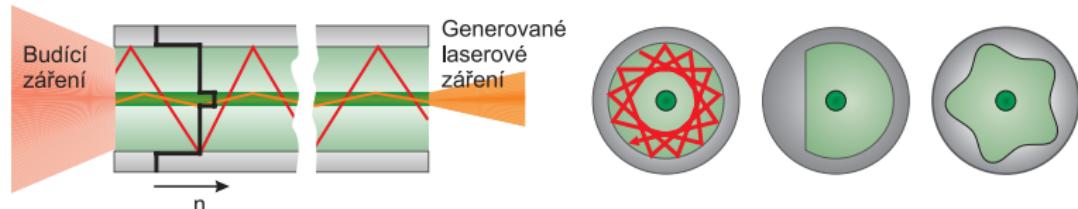
Vláknový laser



Vláknový laser

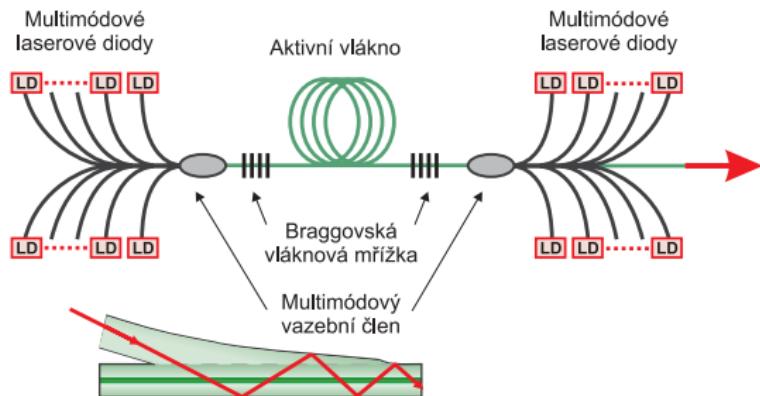
Buzení jádra s dvojitým pláštěm

- Mnohamódový budící svazek se navádí do pláště $\varnothing 100 - 1000 \mu\text{m}$, jednomodové generované záření se šíří jádrem $\varnothing 10 - 500 \mu\text{m}$



Vláknový laser

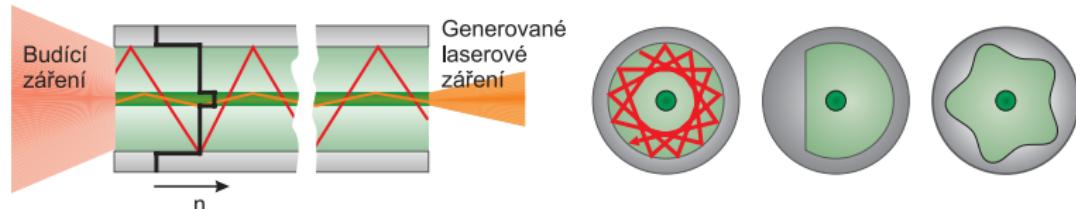
- Na 1 m vlákna lze ve vzduchu disipovat 150 W tepla



Vláknový laser

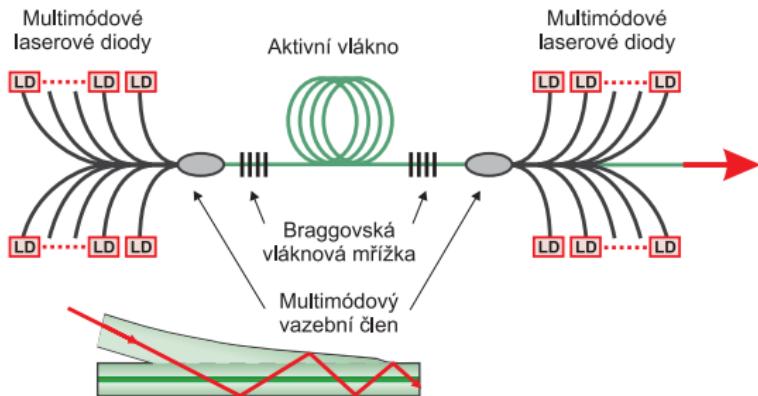
Buzení jádra s dvojitým pláštěm

- Mnohamódový budící svazek se navádí do pláště $\varnothing 100 - 1000 \mu\text{m}$, jednomodové generované záření se šíří jádrem $\varnothing 10 - 500 \mu\text{m}$



Vláknový laser

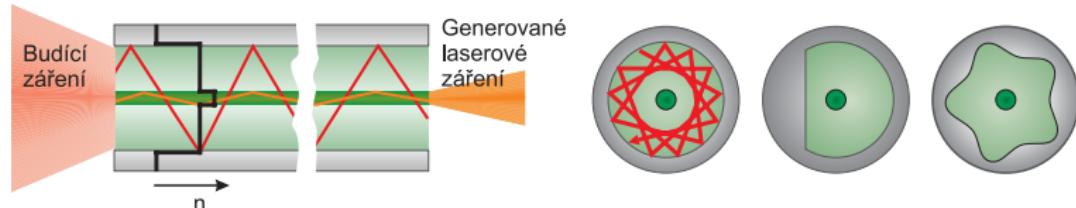
- Na 1 m vlákna lze ve vzduchu disipovat 150 W tepla
- Práh optického poškození skla $\sim 10^{10} \text{ W/cm}^2$



Vláknový laser

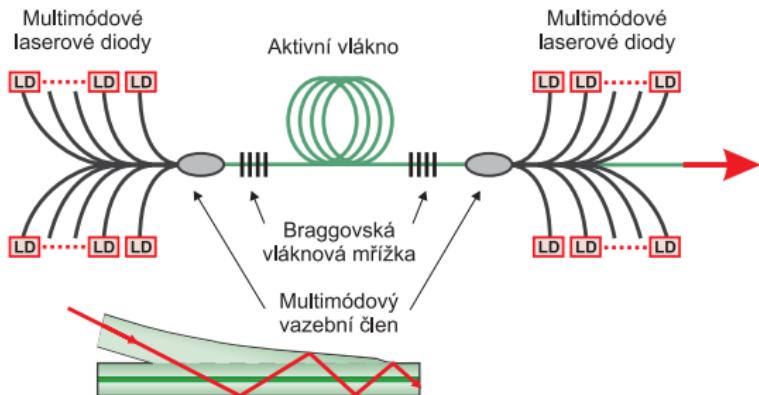
Buzení jádra s dvojitým pláštěm

- Mnohamódový budící svazek se navádí do pláště $\varnothing 100 - 1000 \mu\text{m}$, jednomodové generované záření se šíří jádrem $\varnothing 10 - 500 \mu\text{m}$



Vláknový laser

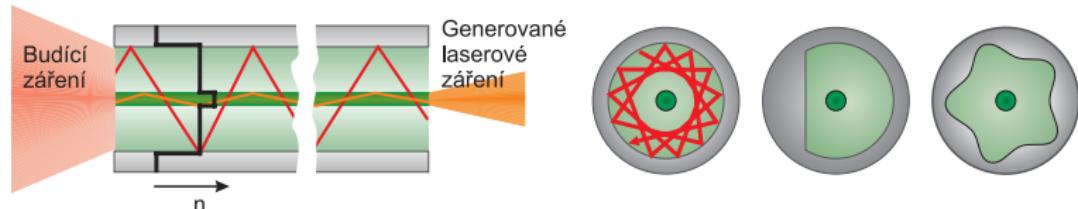
- Na 1 m vlákna lze ve vzduchu disipovat 150 W tepla
- Práh optického poškození skla $\sim 10^{10} \text{ W/cm}^2$
 - SM jádro $\varnothing 10 \mu\text{m} \Rightarrow$ mezní výkon 1 kW



Vláknový laser

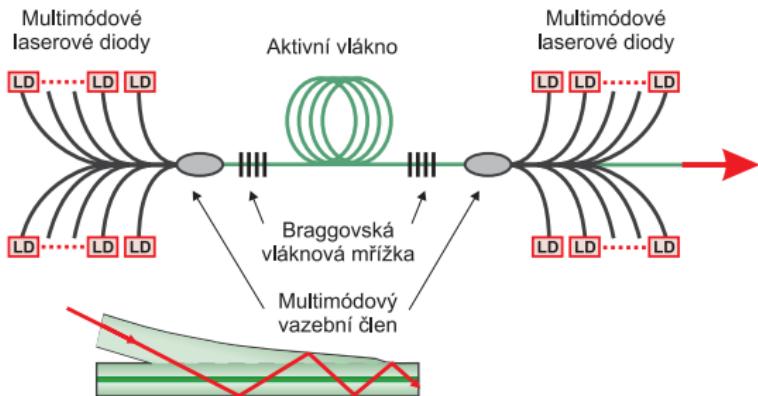
Buzení jádra s dvojitým pláštěm

- Mnohamódový budící svazek se navádí do pláště $\varnothing 100 - 1000 \mu\text{m}$, jednomodové generované záření se šíří jádrem $\varnothing 10 - 500 \mu\text{m}$



Vláknový laser

- Na 1 m vlákna lze ve vzduchu disipovat 150 W тепла
- Práh optického poškození skla $\sim 10^{10} \text{ W/cm}^2$
 - SM jádro $\varnothing 10 \mu\text{m} \Rightarrow$ mezní výkon 1 kW
 - LMA jádro $\varnothing 40 \mu\text{m} \Rightarrow$ mezní výkon 16 kW



Vláknový laser

Průmyslový kontinuální vláknový laser 20 kW (IPG Photonics)



Nominal laser power	20.0 kW
(at the workpiece)	
Maximum laser power	21.0 kW
Wavelength:	1070 nm
Fiber core:	Ø 200 µm
Fiber Length	up to 50m
BPP	11mmxmrad
Foot Print	800 x 1.460 mm
Height	1.500 mm
Cooling capacity	64 kW
WPE	> 29%

Almantas Galvanauskas, Europhoton 2006

Vláknový laser

Průmyslový kontinuální vláknový laser 20 kW (IPG Photonics)



Nominal laser power (at the workpiece)	20.0 kW
Maximum laser power	21.0 kW
Wavelength:	1070 nm
Fiber core:	Ø 200 µm
Fiber Length	up to 50m
BPP	11mmxmrad
Foot Print	800 x 1.460 mm
Height	1.500 mm
Cooling capacity	64 kW
WPE	> 29%

Almantas Galvanauskas, Europhoton 2006

- ▶ Northrop Grumman Space Technology > 100 kW (2009)

Vláknový laser

Průmyslový kontinuální vláknový laser 20 kW (IPG Photonics)

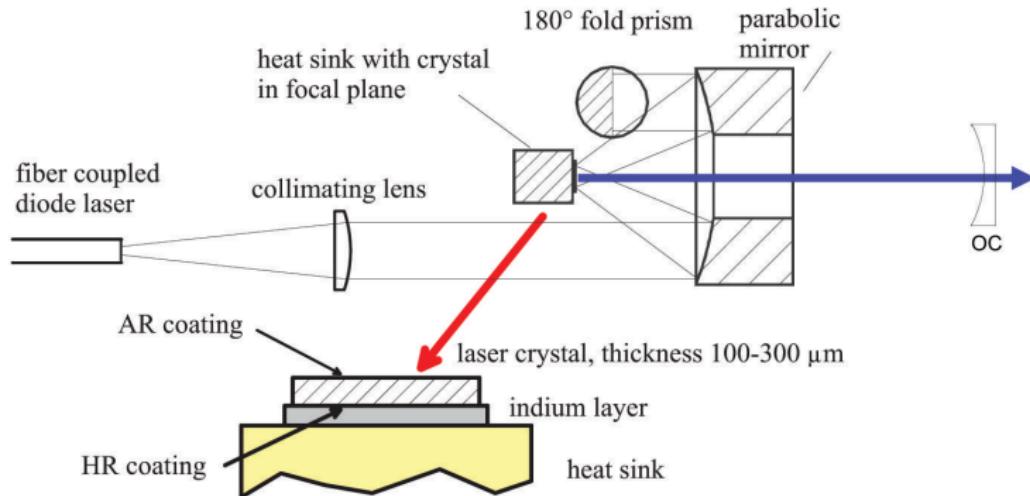


Nominal laser power	20.0 kW
(at the workpiece)	
Maximum laser power	21.0 kW
Wavelength:	1070 nm
Fiber core:	Ø 200 µm
Fiber Length	up to 50m
BPP	11mmxmrad
Foot Print	800 x 1.460 mm
Height	1.500 mm
Cooling capacity	64 kW
WPE	> 29%

Almantas Galvanauskas, Europhoton 2006

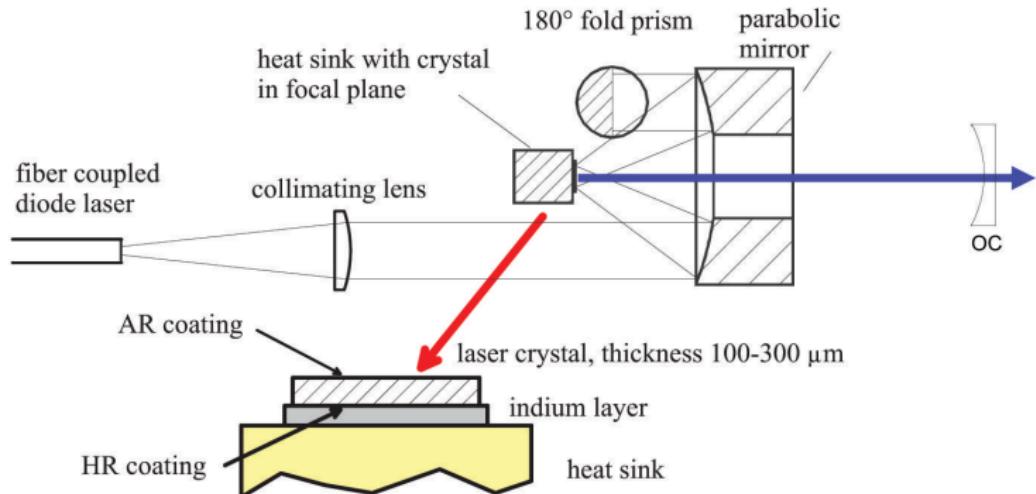
- ▶ Northrop Grumman Space Technology > 100 kW (2009)
- ▶ Energie v gigantickém impulzu max několik mJ (SBS, SRS)

Tenký disk



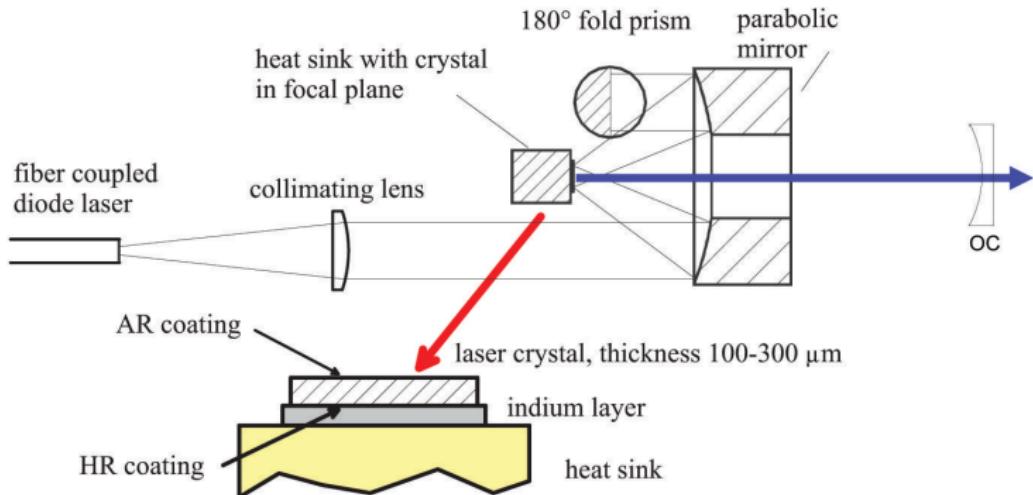
- Rozměry disku: $\varnothing \sim 5 - 20 \text{ mm}$, tloušťka $100 - 500 \mu\text{m}$

Tenký disk



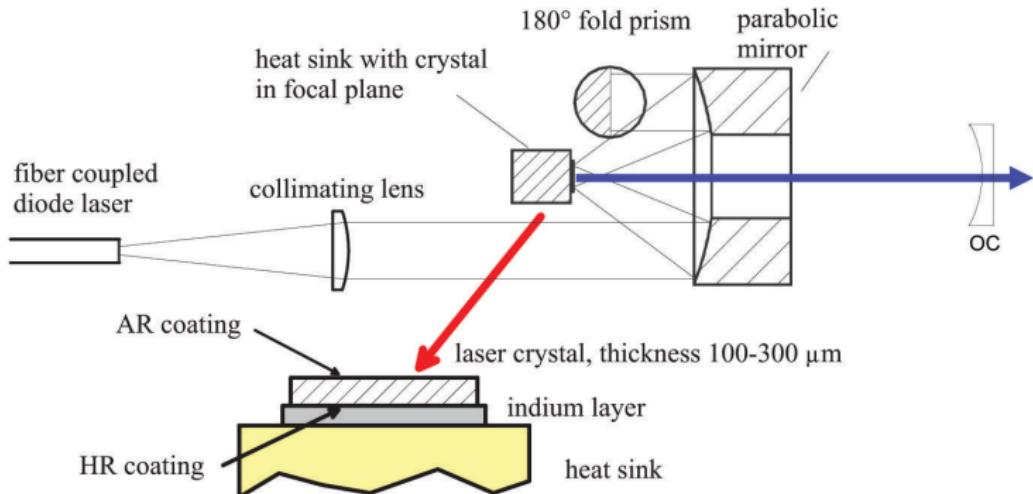
- ▶ Rozměry disku: $\varnothing \sim 5 - 20 \text{ mm}$, tloušťka $100 - 500 \mu\text{m}$
 - ▶ Pro dosažení dobré absorpcie čerpacího záření nutný mnohonásobný průchod diskem ($\alpha_{abs} \sim 10 - 20 \text{ cm}^{-1}$)

Tenký disk



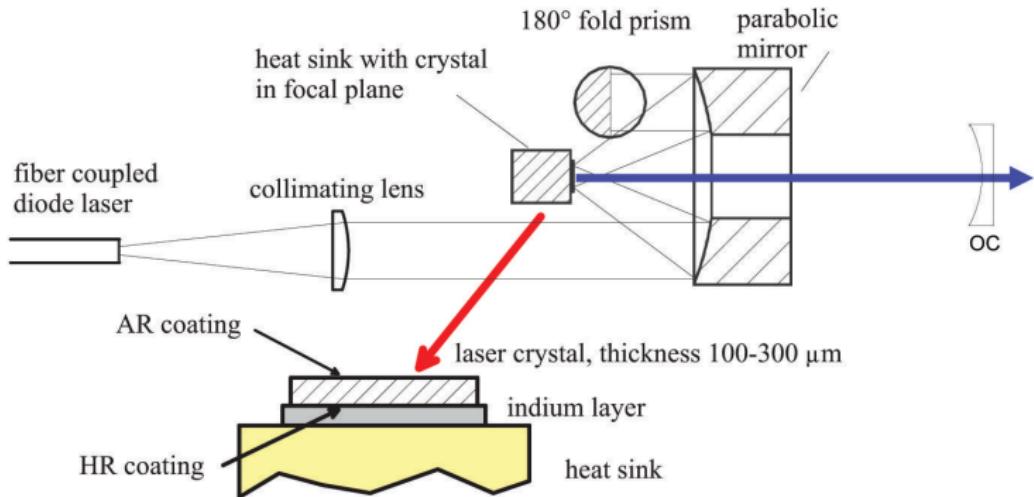
- ▶ Rozměry disku: $\varnothing \sim 5 - 20 \text{ mm}$, tloušťka $100 - 500 \mu\text{m}$
 - ▶ Pro dosažení dobré absorpce čerpacího záření nutný mnohonásobný průchod diskem ($\alpha_{abs} \sim 10 - 20 \text{ cm}^{-1}$)
- ▶ Gradient teploty paralelní s generovaným laserovým svazkem \Rightarrow minimální distorze vlnoplochy, vysoká kvalita laserového svazku

Tenký disk



- ▶ Rozměry disku: $\varnothing \sim 5 - 20 \text{ mm}$, tloušťka $100 - 500 \mu\text{m}$
 - ▶ Pro dosažení dobré absorpce čerpacího záření nutný mnohonásobný průchod diskem ($\alpha_{abs} \sim 10 - 20 \text{ cm}^{-1}$)
- ▶ Gradient teploty paralelní s generovaným laserovým svazkem \Rightarrow minimální distorze vlnoplochy, vysoká kvalita laserového svazku
- ▶ Velký průměr laserového svazku ($\sim 0,2 - 5 \text{ mm}$) \Rightarrow velká energie/špičkový výkon impulzu

Tenký disk



- ▶ Rozměry disku: $\varnothing \sim 5 - 20 \text{ mm}$, tloušťka $100 - 500 \mu\text{m}$
 - ▶ Pro dosažení dobré absorpce čerpacího záření nutný mnohonásobný průchod diskem ($\alpha_{abs} \sim 10 - 20 \text{ cm}^{-1}$)
- ▶ Gradient teploty paralelní s generovaným laserovým svazkem \Rightarrow minimální distorze vlnoplochy, vysoká kvalita laserového svazku
- ▶ Velký průměr laserového svazku ($\sim 0,2 - 5 \text{ mm}$) \Rightarrow velká energie/špičkový výkon impulzu
- ▶ Velká koncentrace energie – chlazení disku je kritické

TRUMPF TruDisk Laser – kontinuální výkon až 16 kW

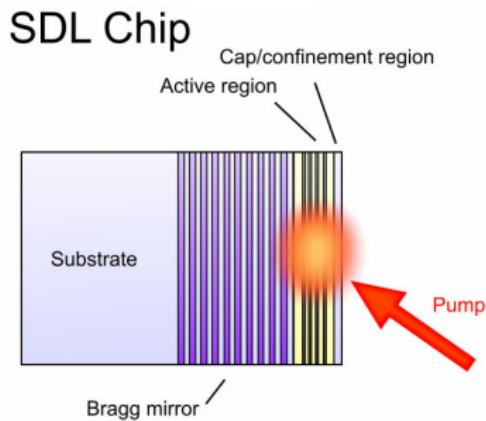
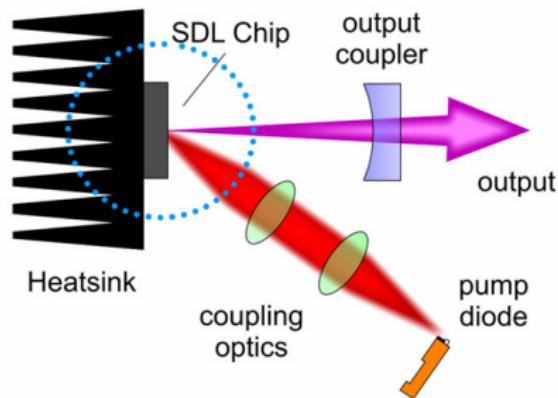
- ▶ Aktivní prostředí Yb:YAG
- ▶ Z jednoho disku střední výkon až 5 kW
- ▶ Větší výkon je možné získat řazením disků do série
- ▶ Možnost generace v režimu Q-spínání nebo synchronizace módů
- ▶ Životnost čerpacích diod 50 khod
- ▶ Účinnost el. zásuvka → laserové záření ~ 30 %



TruDisk 4002: 4kW Dominik Bauer, Photonics West 2009

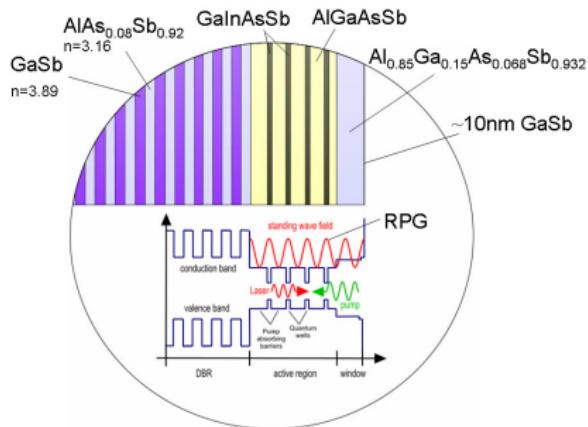
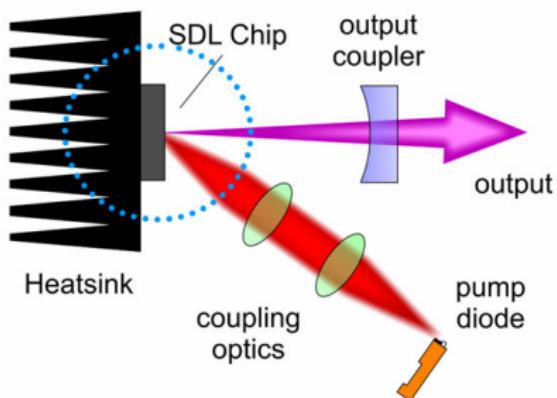
Semiconductor Disc Laser

- Aktivní prostředí tvoří opticky čerpaná polovodičová struktura – kaskáda kvantových jam (QW) + Braggovské zrcadlo



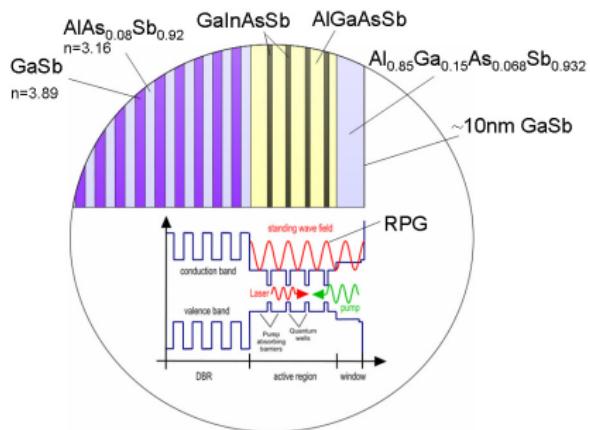
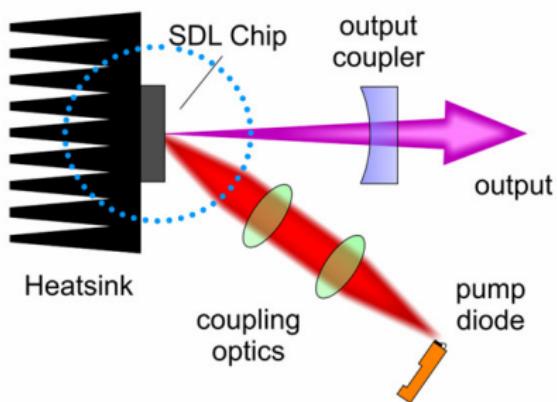
Semiconductor Disc Laser

- ▶ Aktivní prostředí tvoří opticky čerpaná polovodičová struktura – kaskáda kvantových jam (QW) + Braggovské zrcadlo
- ▶ Šířka kvantové jámy určuje pracovní energetické hladiny

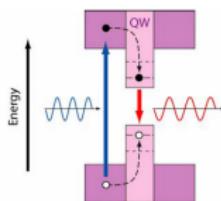


Semiconductor Disc Laser

- ▶ Aktivní prostředí tvoří opticky čerpaná polovodičová struktura – kaskáda kvantových jam (QW) + Braggovské zrcadlo
- ▶ Šířka kvantové jámy určuje pracovní energetické hladiny

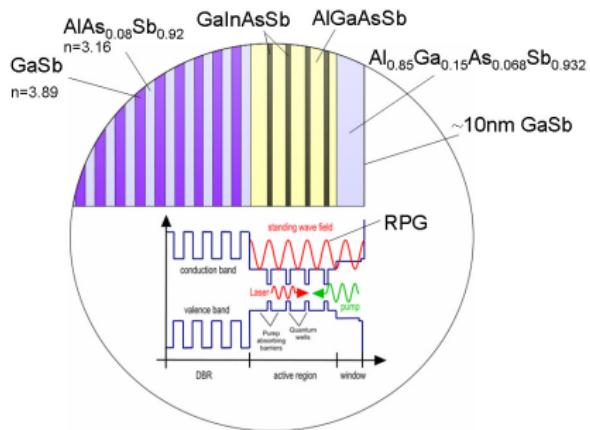
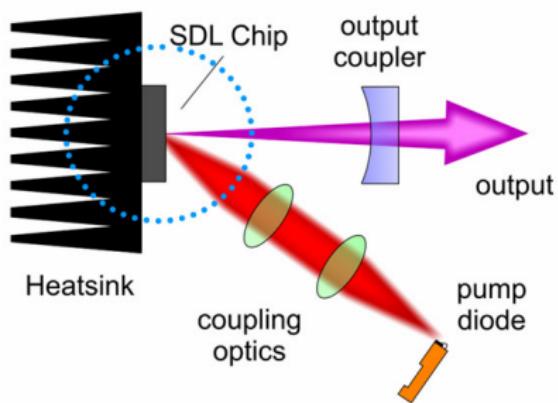


- ▶ K čerpání je možné využít absorpcí bariéry \Rightarrow účinnější absorpcce ale větší kvantový defekt

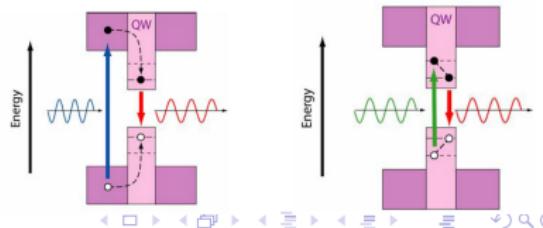


Semiconductor Disc Laser

- ▶ Aktivní prostředí tvoří opticky čerpaná polovodičová struktura – kaskáda kvantových jam (QW) + Braggovské zrcadlo
- ▶ Šířka kvantové jámy určuje pracovní energetické hladiny



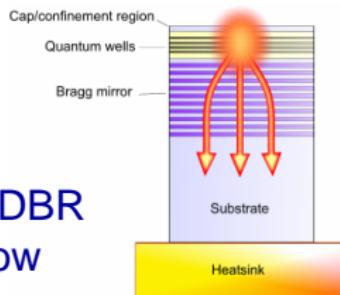
- ▶ K čerpání je možné využít absorpcí bariéry \Rightarrow účinnější absorpcie ale větší kvantový defekt
- ▶ Nebo absorpcí na přechodech QW \Rightarrow slabší absorpcie, ale menší generace tepla



Semiconductor Disc Laser

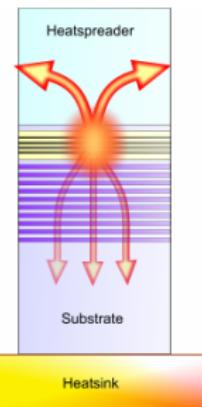
Odvod tepla z aktivní oblasti SDL

Substrate and DBR
impede heat flow



Alford et al.

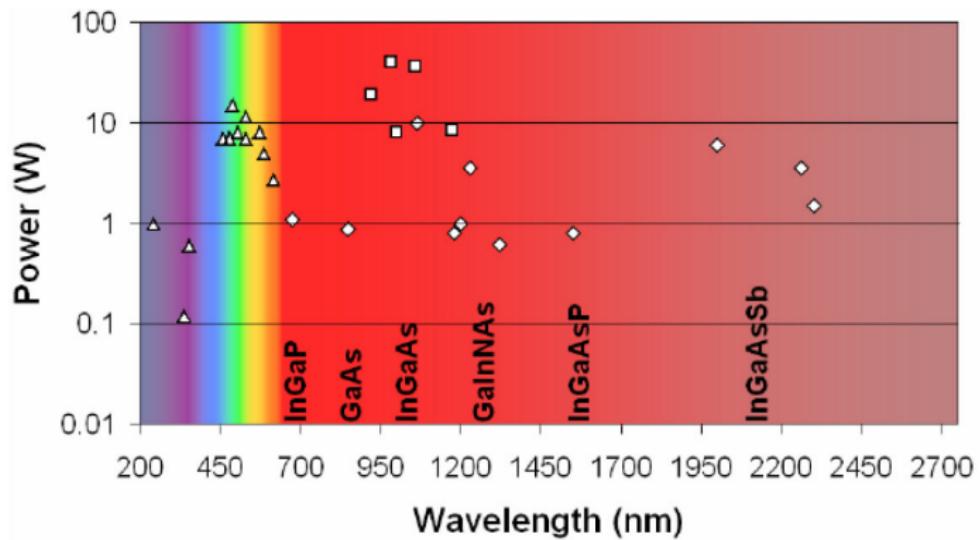
Heatspreaders
Add high conductivity
crystal



Thin Device
Remove
Substrate

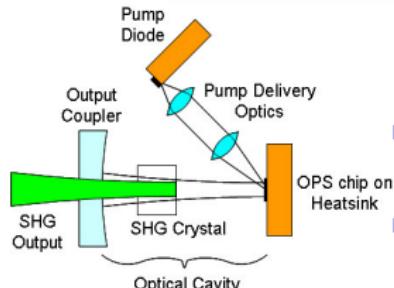
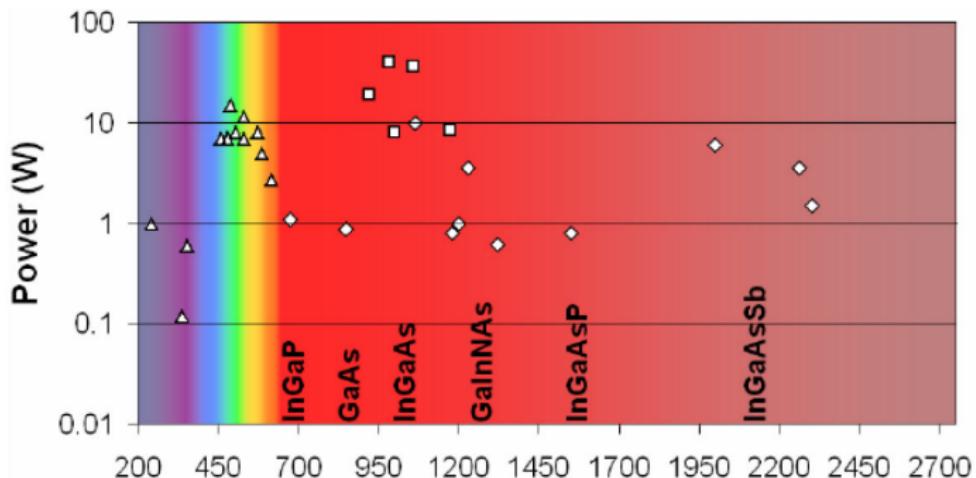
Semiconductor Disc Laser

Demonstrované možnosti SDL



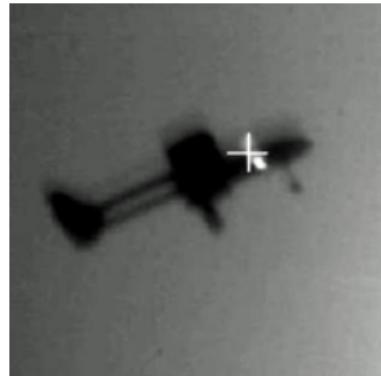
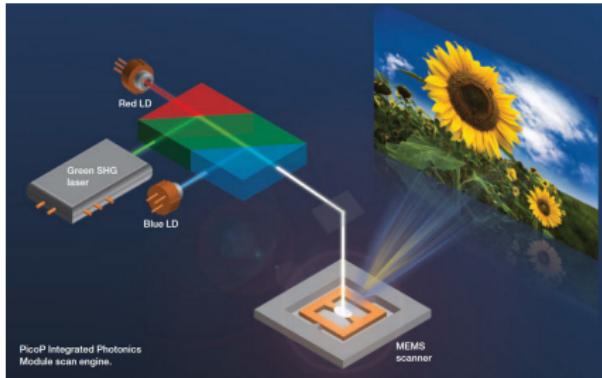
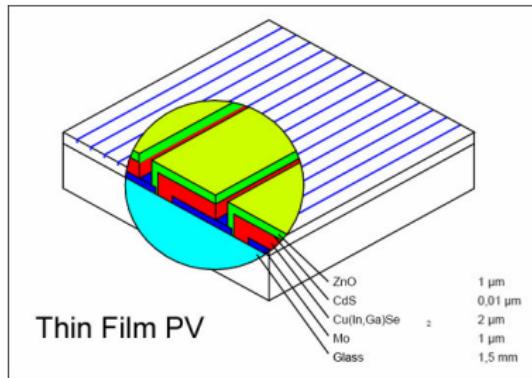
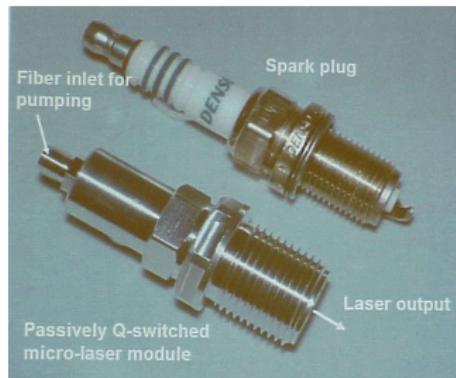
Semiconductor Disc Laser

Demonstrované možnosti SDL

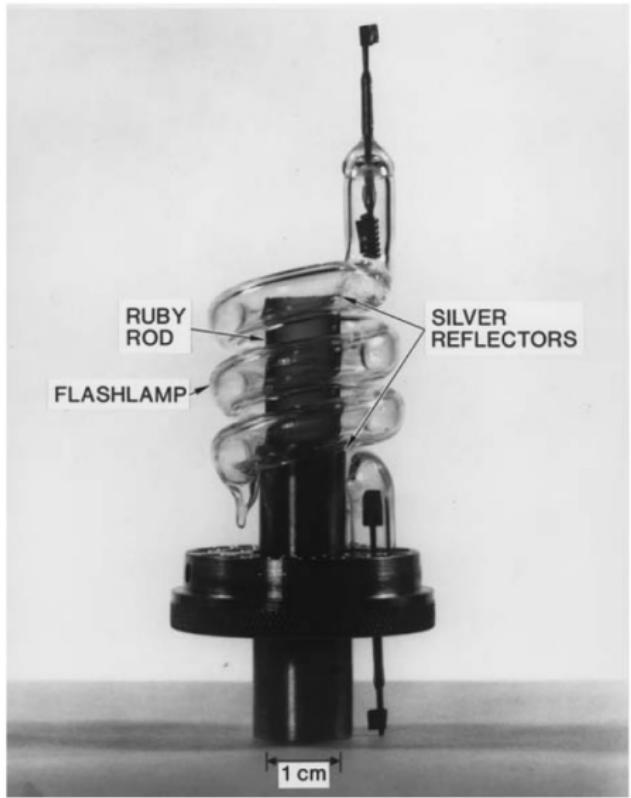


- ▶ Vhodnou volbou polovodičů je třeba upravit šířku zakázaného pásu
- ▶ Generace druhé harmonické frekvence ⇒ rozšíření spektra na VIS (589,0 nm laser guide-star)

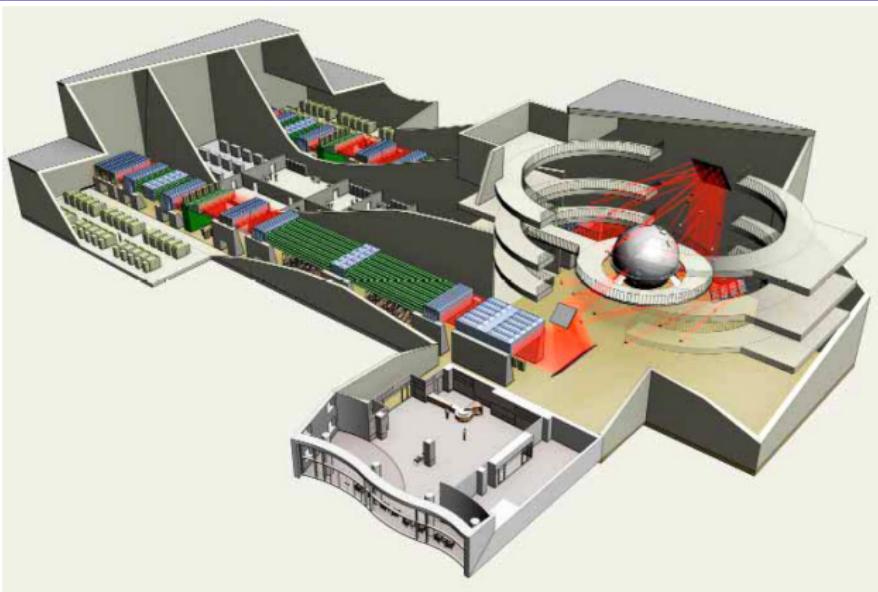
Zajímavé aplikace



Historie laseru



European High Power laser Energy Research facility (HiPER)



Největší diodově čerpaný pevnolátkový laser (plán)

- ▶ 60 svazků
- ▶ „dlouhý“ (5 ns) impuls 200 kJ, „krátký“ (10 ps) impuls 70 kJ
- ▶ Opakovací frekvence 10 Hz
- ▶ (HiLASE: 1-2 J, 1-2 ps, 1 kHz; ELI: 300 J, 15 fs, 0,1 Hz)

-  VRBOVÁ M., JELÍNKOVÁ H., GAVRILOV P.: *Úvod do laserové techniky*, Skriptum FJFI ČVUT, Praha, 1994 (<http://space.fjfi.cvut.cz/web/sulc/ulat/>)
-  VRBOVÁ M. a kol.: *Lasery a moderní optika - Oborová encyklopédie*, Prometheus, Praha, 1994
-  Sochor V.: *Lasery a koherentní svazky*, Academia, Praha, 1990
-  Engst P., Horák M.: *Aplikace laserů*, SNTL, Praha, 1989
-  SALEH, B. E. A. TEICH, M. C.: *Základy fotoniky - 3.díl*, Matfyzpress, Praha, 1995.
-  Přednáška
<http://space.fjfi.cvut.cz/web/sulc/modo/modo.pdf>
-  LaserFest
<http://www.laserfest.org/>
-  European High Power laser Energy Research facility (HiPER)
<http://www.hiper-laser.org/>