

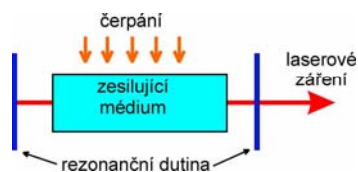
Obsah

- ◆ Vláknový laser (kontinuální a pulzní režim)
- ◆ Vláknové lasery s dalšími prvky vzácných zemin
- ◆ Vysoký výkon z vláknových laserů
 - ◆ optimální průřez vnitřního pláště dvouploškového (DC) vlákna
 - ◆ vazba záření z čerpací laserové diody (nebo pole diod) do MMF
 - ◆ spojení záření signálu a čerpání do DC vlákna
 - ◆ pláštěm čerpané vláknové lasery FJFI & ÚFE
 - ◆ výkonová omezení
 - ◆ zvyšování výkonu spojováním svazků
- ◆ Příklady využití vláknových laserů

1

Kontinuální vláknové lasery

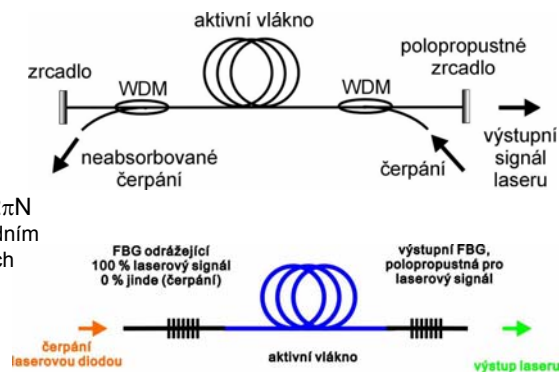
laser – optický oscilátor



podmínky laserových oscilací:

1. zisk aktivního média přesně kompenzuje ztráty rezonátoru
2. fázový synchronizmus $\Delta\varphi=2\beta L=2\pi N$
signál zpětné vazby je sfázován s původním vstupním signálem. Vzdálenost podélných módů F-P rezonátoru $\Delta\nu=c/2L$,
např. $L=10\text{ m}$ $\Delta\nu=10\text{ MHz}$.
(srv. InGaAsP laser $\lambda=1300\text{ nm}$:
 $L=300\text{ }\mu\text{m} \rightarrow \Delta\nu=142\text{ GHz}$,
resp. $\Delta\lambda=\lambda^2\Delta\nu/c=0,8\text{ nm}$.)

1. uspořádání rezonátoru:
lineární (Fabryův-Perotův rezonátor)

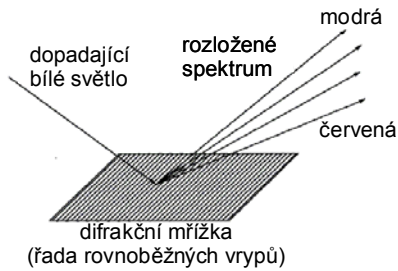


2

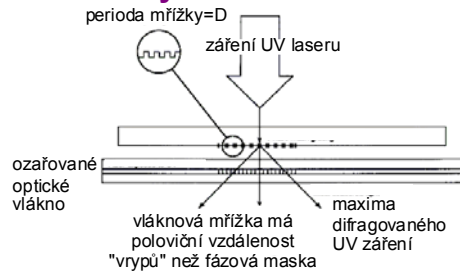
Braggovské vláknové mřížky

Fiber Bragg Grating (FBG)

standardní mřížka s vrypů

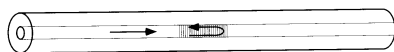


výroba FBG

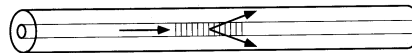


vláknová Braggovská mřížka

$$\lambda_{\text{reflected}} = 2n_{\text{eff}} \Lambda$$



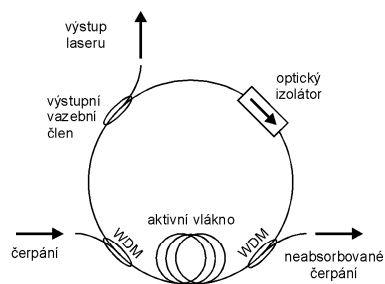
srv. mřížka s dlouhou periodou (long-period grating, LPG)



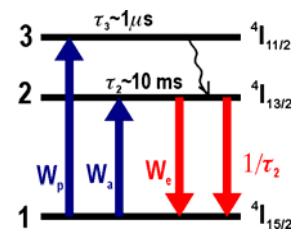
3

Kontinuální vláknové lasery

2. uspořádání rezonátoru: kruhový rezonátor



Vzdálenost podélných módů kruhového rezonátoru $\Delta\nu = c/L$, $\Delta\nu = 10$ MHz pro $L=20$ m.



rychlostní rovnice:

$$\frac{dN_2}{dt} = W_p N_1 + W_a N_1 - \frac{N_2}{\tau_2} - W_e N_2,$$

$$N_1 = N_{\text{tot}}^{Er} - N_2,$$

$$W_e = \frac{\sigma_e \Gamma P_s}{h \nu_s}, W_a = \dots, W_p = \dots,$$

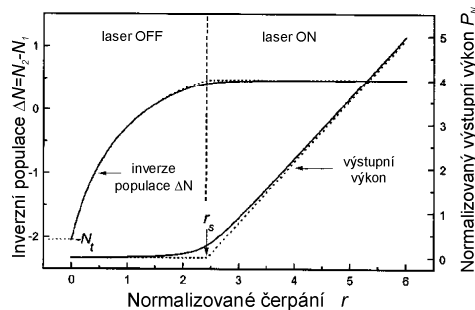
inverzní populace $\Delta N = N_2 - N_1$ nezávisí na z , $\sigma_a = \sigma_e = \sigma_s \rightarrow$ výstupní fotonový tok:

$$\frac{dP_s}{dt} = (N_2 - N_1) c \sigma_s \Gamma P_s - \frac{P_s}{\tau_c} + sp.em.$$

4

Kontinuální vláknové lasery – ustálený stav

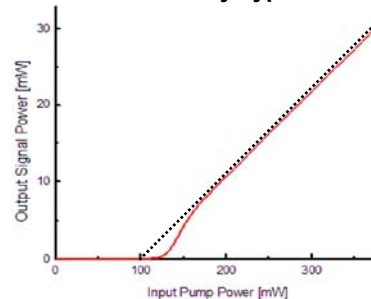
zjednodušený výpočet



plná čára: výpočet s uvažováním zesílené
spontánní emise (ASE)
tečkovaná čára: výpočet bez ASE

$$P_N = (\eta - 1)(r - r_{práh})$$

spektrálně a prostorově
rozlišený výpočet



$$\text{normovaný výst. výkon } P_N = \frac{P_s}{P_{sat}}$$

$$\text{saturací signálový výkon } P_{sat} = \frac{h\nu_s}{\Gamma\sigma_s\tau_2}$$

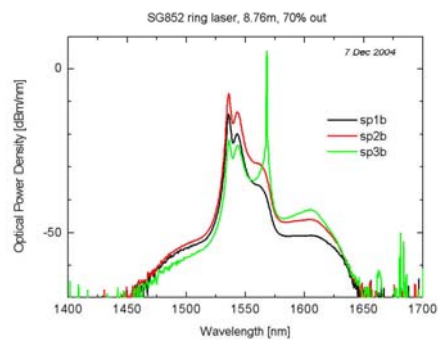
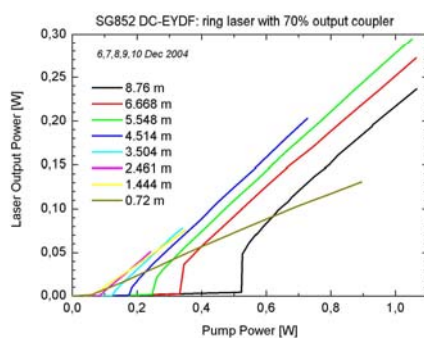
obdobně norm. čerpání r a saturací čerpací výkon

$$\text{parametr } \eta = c\tau_s N_{tot}^{Er}$$

$$\text{normalizovaný práh laseru } r_{práh} = (\eta + 1)/(\eta - 1)$$

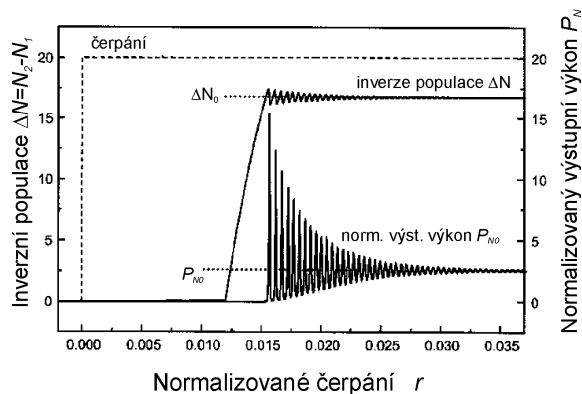
5

Kontinuální vláknové lasery – ustálený stav



6

Kontinuální vláknové lasery – relaxační oscilace



$$P_N \cong P_{N0} + C e^{-t/t_0} \sin(\omega t + \varphi), \quad \text{časová konstanta tlumení relaxacních oscilací: } t_0 = \frac{2\tau_2}{\eta(r-1)}$$

$$\text{kruhová frekvence relaxacních oscilací } \omega = \sqrt{\frac{\eta+1}{\tau_2\tau_c}(r-r_{\text{práh}})}$$

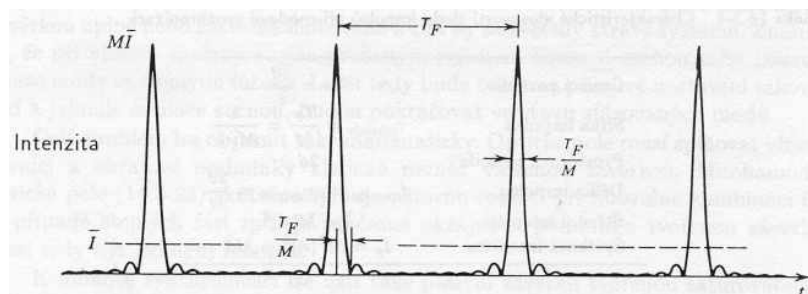
7

synchronizace módů – pulzní laser

Vzdálenost podélných módů kruhového rezonátoru $\Delta\nu = c/L$, $\Delta\nu = 10$ MHz pro $L=20$ m.

Do pásma zesílení erbia se vejde $M \sim 10^5$ módů (obvyklý režim: volně oscilující módy)

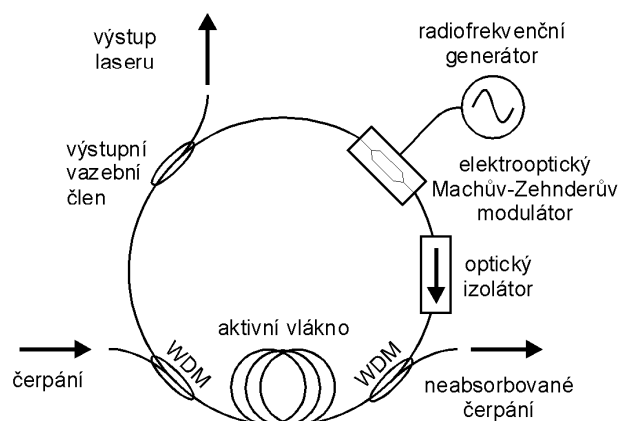
Sfázovaný signál M módů vede k vytvoření sledu impulsů s periodou $T_F = L/c$ (doba oběhu kruhovým rezonátorem)



B. E. A. Saleh a M. C. Teich, "Základy fotoniky", kapitola 14: Lasery, Matfyzpress 1995

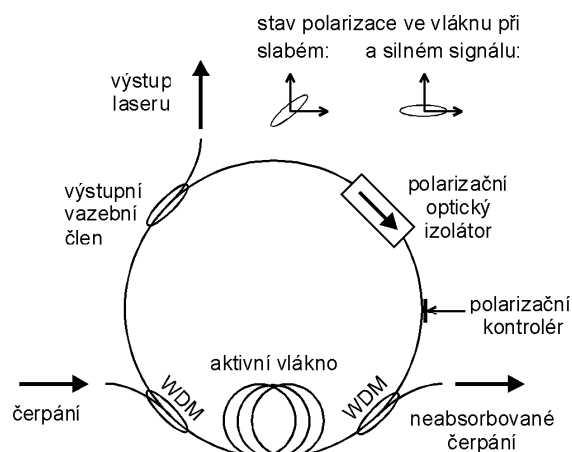
8

Aktivní modová synchronizace



9

Pasivní modová synchronizace



10

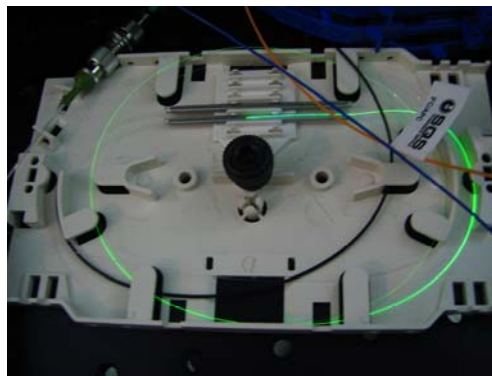
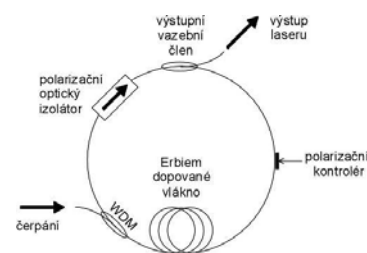
Femtosekundový vláknový laser

Pulsní laser s pasivní vidovou synchronizací díky nelineárnímu natáčení polarizace.

Šířka spektra: **13 nm**, $\lambda_s=1561$ nm

Délka pulsu: **197 fs** ($\Delta\tau \times \Delta\nu = 0.316$)

Opakovací frekvence: **39.68 MHz**
odpovídající perioda je **25.2 ns**
a délka rezonátoru **5.14 m**



EDF: Er80-4/125 (Liekki, Finsko)
L=100 cm
MFD@1550 nm: 6.5 μ m
NA=0.2
peak abs 21530 nm=80 dB/m
cutoff' < 980 nm



11

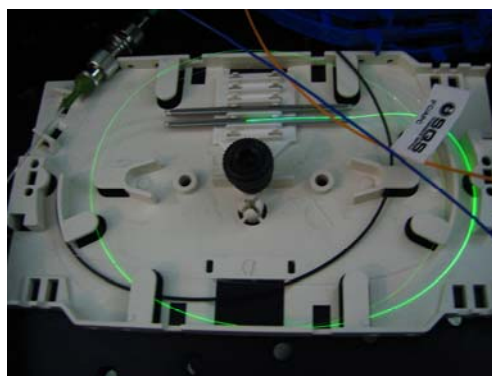
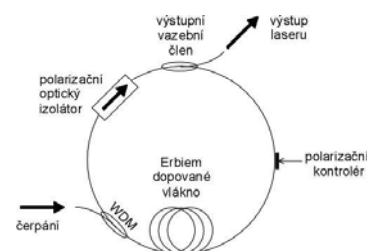
Femtosekundový vláknový laser

Pulsní laser s pasivní vidovou synchronizací díky nelineárnímu natáčení polarizace.

Šířka spektra: **13 nm**, $\lambda_s=1561$ nm

Délka pulsu: **197 fs** ($\Delta\tau \times \Delta\nu = 0.316$)

Opakovací frekvence: **39.68 MHz**
odpovídající perioda je **25.2 ns**
a délka rezonátoru **5.14 m**

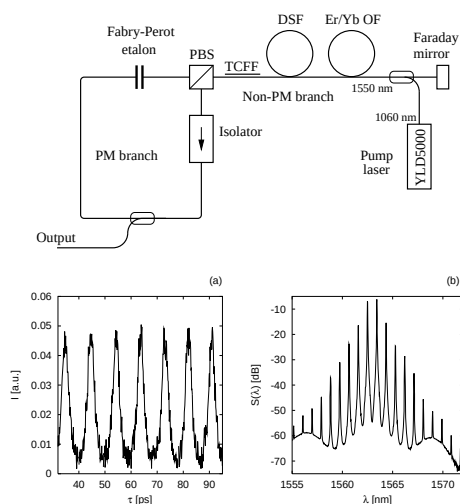


Liekki Er80 4-125, price per 1m	4 583 Kč
polarization controller OZ-optics	9 464 Kč
LD @ 980nm, 300mW, Furukawa-Fitel 2002	42 588 Kč
WDM 980/1550 Opneti China	1 893 Kč
isolator Opneti China	2 011 Kč
fs vláknový laser bez elektroniky	19 844 Kč



12

Pulzní vláknový laser založený na modulační nestabilitě



jev modulační nestability (MI) vzniká v nelineárním disperzním prostředí – optickém vlákně

spektrum: MI se projevuje jako spontánní nárůst postranních pásem u kontinuální vlny

časový průběh: MI štěpí kontinuální signál na pulzy nebo modulovaný signál

V telekomunikacích nežádoucí jev. Vložíme-li do dutiny laseru s vhodnou disperzí **hřebenový filtr** (F-P etalon, dvoujádrové vlákno) lze tak získat vláknový laser generující sled pulzů s vysokou opakovací frekvencí

MI laser s Fabryovým-Perotovým etalonem:

$f=107$ GHz, šířka pulsu: **2 ps**

MI laser s TCF:

$f=206$ GHz, šířka pulsu: **2.7 ps**

13

Q-klíčované vláknové lasery

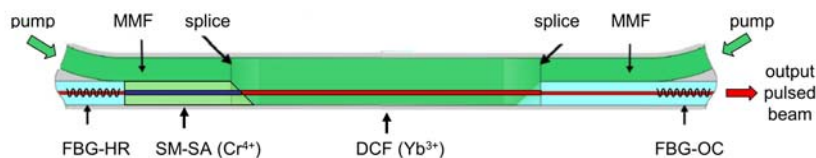


Fig. 2: example of linear Fabry-Perot PQS fibre laser based on the $\text{Yb}^{3+}:\text{Cr}^{4+}$ atomic system. DCF: Yb^{3+} -doped ovale double-clad fibre; SM-SA: Cr^{4+} -doped singlemode saturable absorber; MMF: pump carrying multimode fibre; FBG-HR: highly reflecting fibre Bragg grating mirror; FBG-OC: fibre Bragg grating output coupler. Note that the SM-SA could also be located just before the FBG-OC.

Další metody pasivního Q-klíčování: Carbon nanotubes, SESAM

14

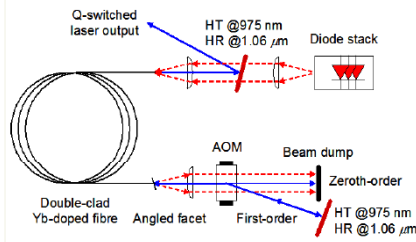
High-power Q-switched Yb-doped fiber lasers

Extractable energy⁶:

$$E_{\text{ext}} = h\nu_L A_{\text{co}} \left[\int_0^l N_2(z) dz - \frac{N/\sigma_a(\lambda_L)}{\sigma_e(\lambda_L) + \sigma_a(\lambda_L)} \right]$$

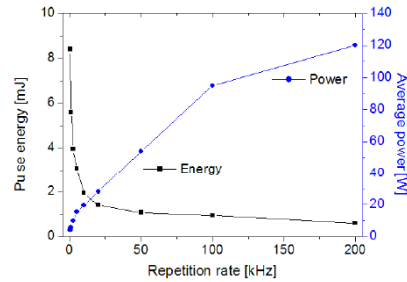
As a very rough guide, the extractable energy stored in a fiber is limited by ASE to around ten times the saturation energy $E_{\text{sat}} \approx h\nu_L A_{\text{co}} / [\sigma_a(\lambda_L) + \sigma_e(\lambda_L)] \eta_L$. In other words, the upper-limit on pulse energy is determined mainly by the core area. E_{ext} is $\sim 2 - 5 \text{ mJ}$ for typical Yb-doped fiber with a $20 \mu\text{m}$ diameter core. In practice, the maximum pulse energy also depends on other factors as well (e.g. cavity design, fiber length, nonlinear loss processes (SRS, SBS) and fiber damage).

Example⁷:



8.4 mJ @ 0.5 kHz, pulse duration = 460 ns
0.6 mJ @ 200 kHz (120 W)
Beam quality $M^2 \sim 4$

Shorter pulse durations can be achieved using a shorter fiber⁸

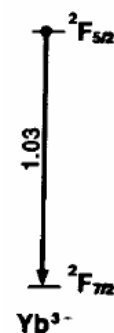
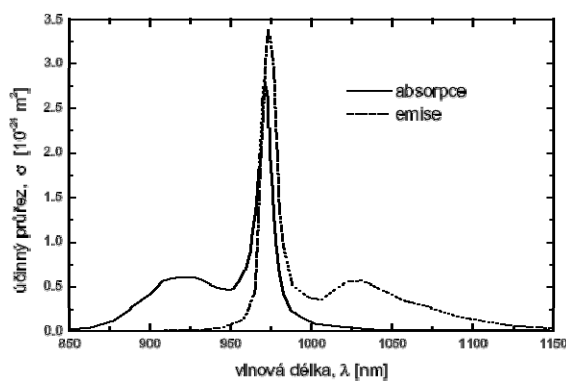


15

Vláknové lasery s jinými prvky vzácných zemin (Yb, Pr, Tm)

16

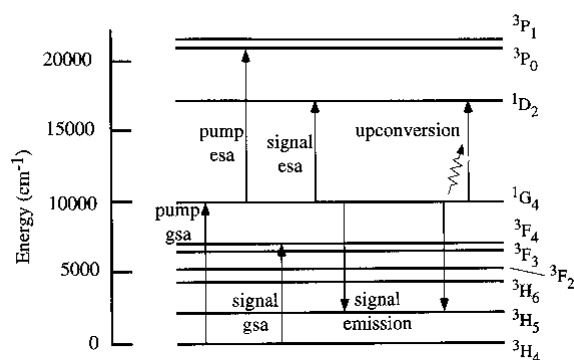
Yterbiem dopovaný vláknový laser



Absorpční a emisní spektrum yterbia v křemenném vlákně

17

Praseodymem dopovaný vláknový zesilovač (PDFA)



krátká doba života hladiny 1G_4 v křemenných vláknech $\Rightarrow$ nutnost používat fluoridová vlákna ($\tau \approx 110 \mu\text{s}$)

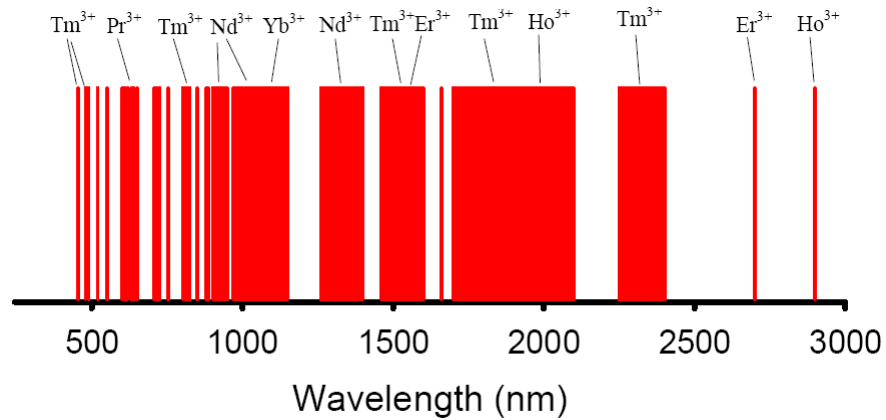
Figure 10.16: Radiative and energy transfer processes of Pr^{3+} , included in an extended model of amplification at $1.3 \mu\text{m}$ in Pr^{3+} -doped fiber amplifiers, after reference [15] (©1992 IEEE).

P. C. Becker, N. A. Olsson and J. R. Simpson, EDFAs: fundamentals and technology, Academic Press, San Diego, USA, 1997.

M. Karásek, "Analysis of gain dynamics in Pr^{3+} -doped fluoride fiber amplifiers", 7(3):299-302, 1995.

18

Operating wavelengths for rare-earth doped fiber lasers in silica and non-silica glasses



21

Vysoký výkon z vláknových laserů - metoda čerpání přes plášť

*Double-clad (DC), high-power fiber lasers
cladding pumping*

22

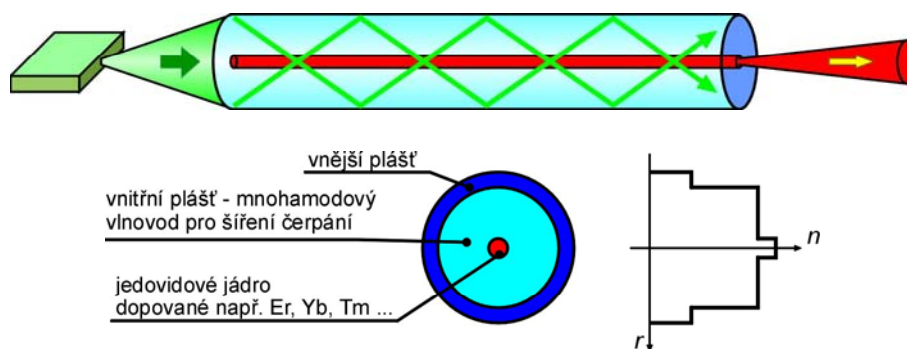
IPG: sváření vláknovým laserem na dálku



5-kW vláknový laser s 2-m ohniskovou vzdáleností při testování sváření na dálku automobilových karosérií.
www.photonics.com/images/features/ipgremotelaser.wmv

23

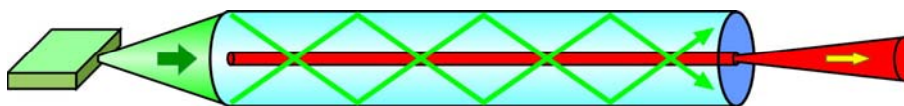
Čerpání přes plášť



Metodou čerpání aktivního prostředí přes plášť je možné transformovat vysoce rozbíhavý svazek z mnohamódových laserových diod s velkou vyzařovací plochou (typicky $100 \times 1 \mu\text{m}$) do kvalitního, jednomódového laserového svazku s malou divergencí.

24

Čerpání přes plášť



Výhody:

stabilita a provozní spolehlivost, kompaktnost, malé rozměry,
výborná modová kvalita výstupního svazku
nízká cena & vysoký výkon

Problémy:

nestandardní vlákna: optimalizace absorpce čerpání a způsob navázání záření do vlákna vyžaduje specifický návrh DC-vlákna ⇒
problémy při výrobě a napojování vláken, menší výběr vláknových komponent

25

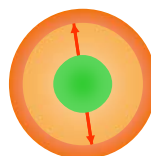
Hledání optimálního průřezu

- **Kruhový průřez** – standardní tvar optických vláken



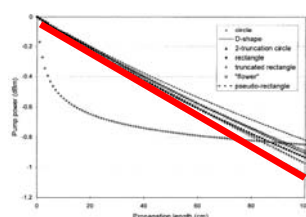
Kosé paprsky

Šroubovitá trajektorie
v projekci obecně
neuzavřený
mnohoúhelník



Meridiánové paprsky

Trajektorie v rovině osy
vlákna



[Doya01] V. Doya, O. Legrand and F. Mortessagne, "Optimized absorption in a chaotic double-clad fiber amplifier", Opt. Lett., 26(12):872-874, 2001.

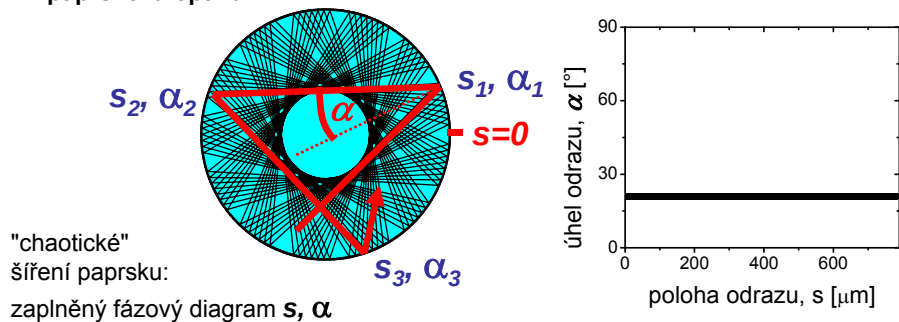
[Leproux01] P. Leproux, S. Février, V. Doya, P. Roy and D. Pagnoux, Modeling and Optimization of Double-Clad Fiber Amplifiers Using Chaotic Propagation of the Pump, Optical Fiber Technology, 7(4):324-339, 2001

26

Hledání optimálního průřezu

Optimální průřez je takový,
který zajistí homogenní (konstantní) útlum čerpání podél vlákna.

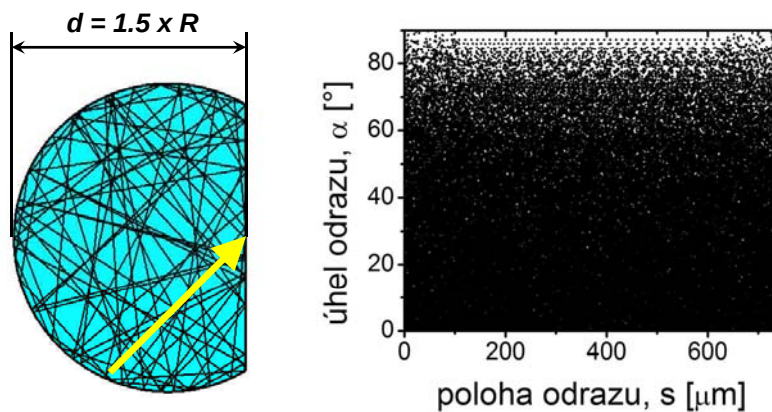
- **vlnová optika:**
statisticky rovnoměrné rozložení intenzity pole v každém bodě podél vlákna
- **paprsková optika:**



27

Zkosený kruh: "D-tvar" vlákna

A. tloušťka vlákna $d > R$

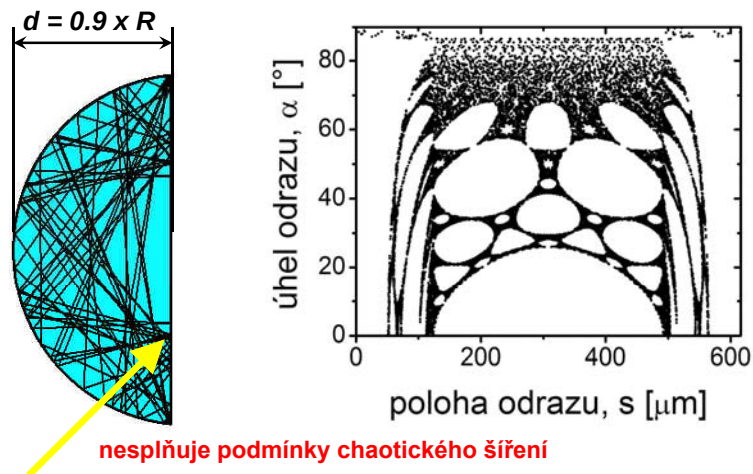


splňuje podmínky chaotického šíření

28

Zkosený kruh: "D-tvar" vlákna

B. tloušťka vlákna $d < R$



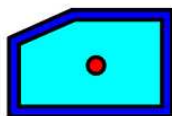
29

Ověřené optimální průřezy

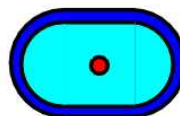
2x zkosený kruh



zkosený obdélník



"stadion"



"kytička"



splňují podmínky chaotického šíření

30

Další optimalizace absorpce

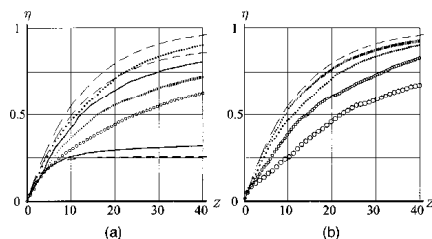
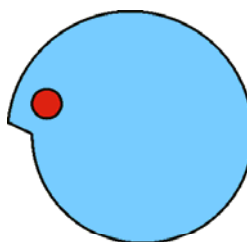


Fig. 3. (a) Efficiency η of absorption of the pump light in the core versus $Z = \kappa_0 z$. Upper dashed curve, case of ideal mixing [estimate by Eq. (9)]; dotted curve, simulation of spiral cladding with displaced core; intermediate dashed curve, the analytical estimate by formula (10); upper solid curve, numerical simulation for the same case, vertical bars, simulation for the starlike cross section; circles, simulation for spiral cladding with centered core; lowest solid curve, simulation for circular-symmetric case; lowest dashed curve, analytical estimation for the same case according to Eq. (11). (b) Efficiency of absorption of the pump light in the core of the offset-spiral double-clad fiber at $\kappa_0 = 0.005 \mu^{-1}$, bars; $0.01 \mu^{-1}$, dots; $0.02 \mu^{-1}$, small circles; $0.04 \mu^{-1}$, large circles; versus dimensionless Z .

$$\eta_{\text{ideal}} = 1 - \exp\left[-2\kappa_0 \left(\frac{r_0}{R_0}\right)^2 z\right], \quad (9)$$

Spirální tvar pláště
s jádrem blízko zlomu

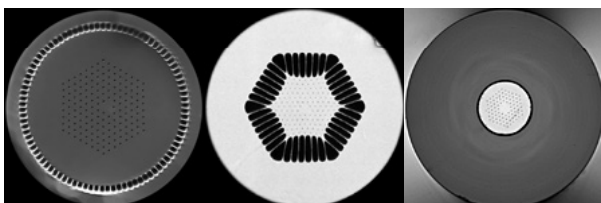


D. Kouznetsov and J. V. Moloney, "Efficiency of pump absorption in double-clad fiber amplifiers. II. Broken circular symmetry," J. Opt. Soc. Am. B 19, 1259-1263 (2002)

I. Dritsas, T. Sun and K. T. V. Grattan, "Stochastic optimization of conventional and holey double-clad fibres", J. Opt. A: Pure Appl. Opt. 9:405-421, 2007.

31

Pláštěm čerpané vláknové lasery – mikrostrukturální vlákna



vyšší NA, až 0,7 → lepší účinnost vazby z čerpací LD
větší jádro → potlačení nelineárních jevů (SBS, SRS)
→ vyšší absorpce čerpání
efektivní „mode scrambling“ dokonce i pro kruhový
průřez vnitřního pláště.

Crystal Fiber, Dánsko, <http://www.crystal-fibre.com/>



32

Vazba záření z čerpací laserové diody nebo pole diod do mnohamódového vlákna

33

Parametr kvality svazku: BPP

Beam Parameter Product: $BPP = w \times \theta$ [mm mrad]

w ... poloměr svazku v krčku

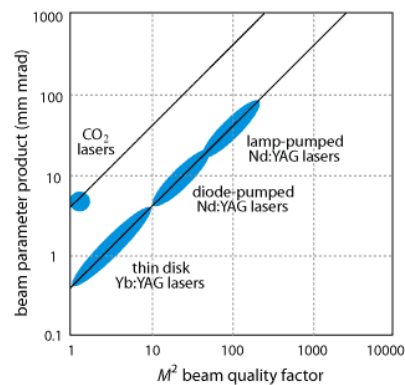
θ ... poloviční úhel divergence svazku měřený ve vzdáleném poli

čím větší BPP, tím méně kvalitní svazek

pro Gaussovský svazek platí

$$\theta = \frac{\lambda}{\pi w} \Rightarrow$$

$$BPP = \lambda/\pi = 0.339 \text{ @ } 1064 \text{ nm}$$



34

Parametr kvality svazku: M^2 -faktor

Definice:
$$M^2 = \frac{BPP}{\lambda / \pi} = \frac{BPP}{BPP_{Gauss}}$$

Divergenci svazku pak lze vyjádřit:

$$\theta = M^2 \frac{\lambda}{\pi w}$$

M^2 faktor určuje:

- na jak malou plošku je možné příslušnou optikou fokuzovat svazek
- spolu s výkonem určuje jas (resp. zářivost) svazku [$\text{W}/\text{m}^2/\text{Sr}$]

Pro nesymetrické svazky (např. pole LD) je M^2 faktor v každé ose jiný

35

Diode Laser Pump Sources

Wavelength options:

GaN	→ 380-nm – 480nm	→ Pr^{3+}
GaInP, AlGaInP	→ 640nm – 680nm	→ Cr:LiCAF, Cr:LiSAF
AlGaAs, GaAs	→ 780nm – 860nm	→ Nd^{3+} , Tm^{3+}
InGaAs	→ 900nm – 980nm	→ Yb^{3+} , Er^{3+}
InGaAsP/InP	→ 1.47 μm – 1.6 μm	→ Er^{3+}
InGaAsP	→ 1.8 μm – 1.96 μm	→ Ho^{3+}

Diode laser types:

(a) Single-stripe (single-mode) diode lasers

Emitter size $\sim 1\mu\text{m} \times \text{few } \mu\text{m}$

Beam divergence (FWHM): $\theta_y \approx 25^\circ - 30^\circ$ (perpendicular to junction) and $\theta_x \approx 7^\circ$ (parallel to junction)

$$M_y^2 = M_x^2 = 1$$

Max. cw output power $\sim 0.5 - 0.8\text{W}$ (limited by catastrophic failure)

36

(b) Broad area diode lasers

Emitter size $\sim 1\mu\text{m} \times \sim 100\mu\text{m}$

Beam divergence (FWHM): $\theta_y \approx 25^\circ - 30^\circ$ and $\theta_x \approx 8^\circ$

$M_y^2 = 1$ and $M_x^2 \sim 15-20$

Max. cw output power $\sim 7 - 8\text{W}$

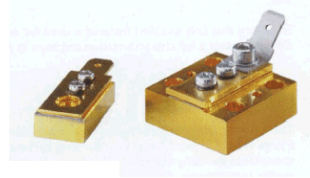
(c) Diode-bars

Emitting region $\sim 1\mu\text{m} \times 10\text{mm}$

Beam divergence (FWHM): $\theta_y \approx 25^\circ - 30^\circ$
and $\theta_x \approx 6^\circ - 9^\circ$

$M_y^2 = 1$ and $M_x^2 \sim 1300-1800$

Max. cw output power $\sim 40-120\text{W}$



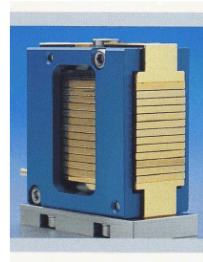
(d) Diode-stacks

Emitter region $\sim N \times \text{bar spacing} \times 10\text{mm}$

Beam divergence (FWHM): $\theta_y \approx 25^\circ - 30^\circ$ and $\theta_x \approx 9^\circ$

$M_y^2 \approx [(N-1) \times \text{bar spacing/emitter height}] + 1$
and $M_x^2 \sim 1300-1800$

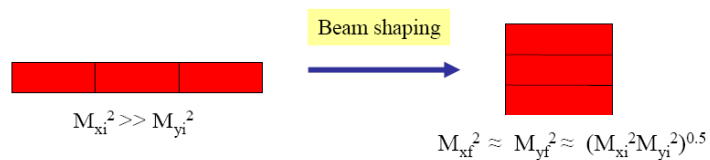
Max. cw output power $\sim 40-120\text{W} \times N$



37

Main requirements for efficient pump coupling:

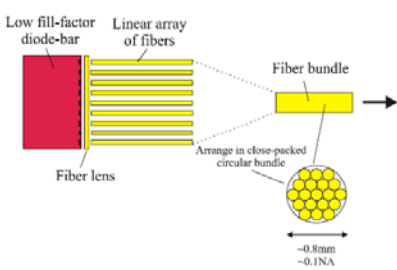
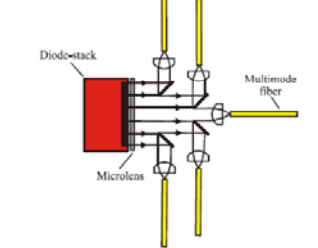
1. Selection of appropriate diode pump laser(s)
2. Pump light collection and aperture filling
3. Re-formatting of the beam using a 'Beam - Shaper' to roughly equalise the M^2 parameters in orthogonal planes preferably without decreasing the brightness



4. Scheme for launching into fiber
5. Management of stray pump light

38

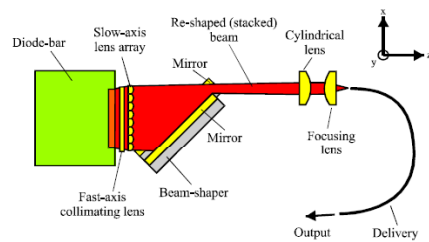
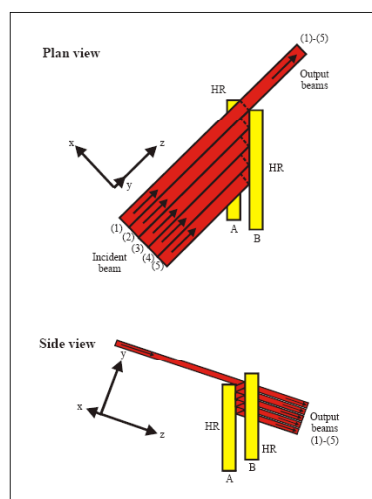
Fiber-bundle-coupled diode-bars: (see refs. 9 and 10)

- (a)
- 
- Simple and robust way to equalise M^2 parameters for diode-bars
 - Fibers are under-filled
→ Low brightness
 - Output from bundle can be coupled into a single delivery fiber using lenses or a multimode coupler (tapered fiber bundle)
- (b)
- 
- Combination of free-space optics and fiber bundle approach
 - Can be used to equalise M^2 parameters for diode-bars or stacks
 - Higher brightness than method (a), but more complicated and expensive
 - Output from bundle can be coupled into a single delivery fiber as for method (a)

39

Free-space beam shaping techniques

(a) Two-mirror beam shaper¹¹



- Two mirrors used to slice beam in poor beam quality direction and stack resulting N beams in the orthogonal direction

$$\rightarrow M_{xf}^2 \approx M_{yf}^2 \approx \sqrt{1.3 M_{xi}^2 M_{yi}^2}$$

$$\text{by choosing } N \approx \sqrt{M_{xi}^2 / 1.3 M_{yi}^2}$$

- Simple + low loss
- Can be used for bars or stacks
- Output can be focussed into the active fiber or delivery fiber

40

Yterbiem dopovaný vláknový laser

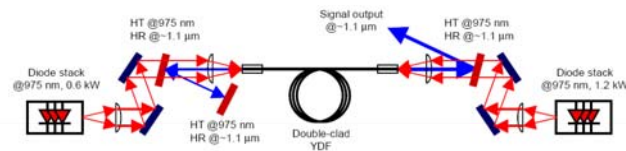


Fig. 1. YDFL experimental arrangement with two diode-stack pump sources.
HR: high reflectivity, HT: high transmission.

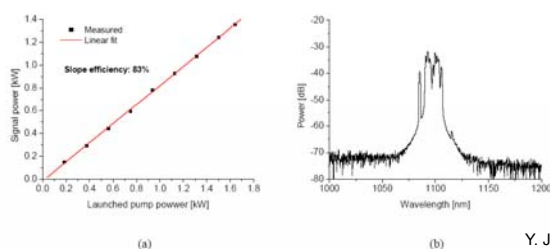


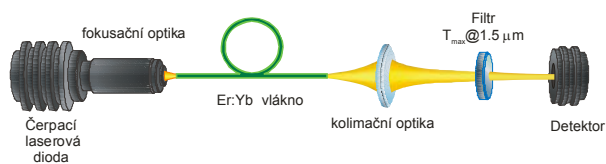
Fig. 2. (a) Fiber laser output power vs. launched pump power. (b) Laser output spectrum at full power.

Y. Jeong, J. Sahu, D. Payne, and J. Nilsson, "Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1.36 kW continuous-wave output power," Opt. Express 12, 6088-6092 (2004)

41

Způsoby navázání záření do vlákna

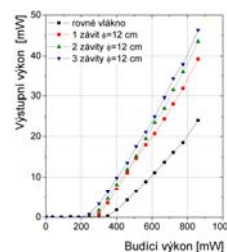
typ A) Er/Yb dopované vlákno SG852 (ÚRE), laser sestaven na FJFI ČVUT
výkonová konverzní účinnost 32% při čerpání 750 mW @ 969 nm



zeleně svítící up-converse



detail zalomení vlákna



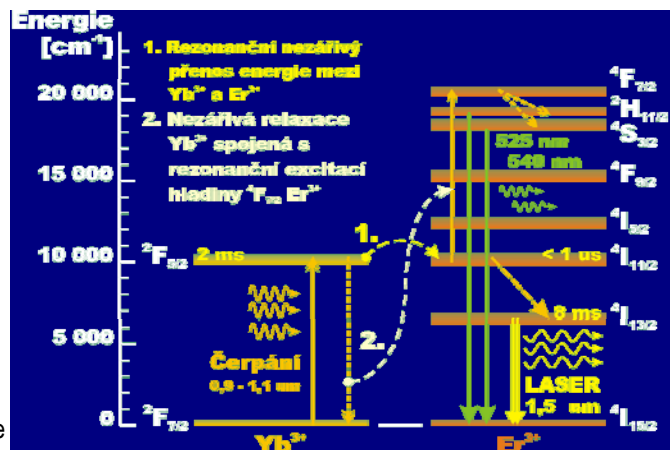
A. Zavadilova, et al., Conference of Advanced Solid-State Photonics ASSP'05, paper WB25, Wien, Austria, February 6-9, 2005
P. Peterka et al., Photonics Prague 2005, June 10, 2005

42

Schéma energetických hladin iontů Er a Yb



zeleně svítící up-converse



43

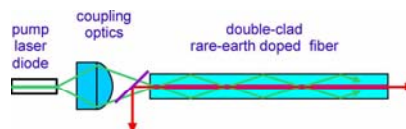
Metody napojení záření signálu a čerpání do jednoho dvouplášťového vlákna

44

Způsoby navázání záření do vlákna

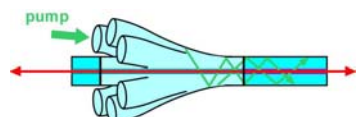
a) přímé navázání objemovými prvky

často využíváné v laboratořích, nutnost nastavování



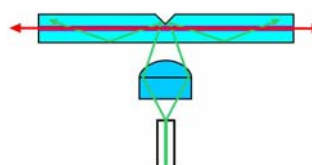
b) svazek vláken obsahující signálové vlákno a čerpací vlákno(a), např. svařovaný vazební člen

Tapered multimode-fiber coupler: Gapontsev V. P. et al., CLEO'96 (1996), 205.
Star coupler: DiGiovanni D. J., U.S. Patent 5 864 644 (1999).
GTWave fiber: Grudin A. B. et al., CLEO'99 (1999) CPD26.



c) stranové čerpání

V-groove pumping: Goldberg L., El. Lett., 33 (1997) 2127.
Grating or prism coupling: Weber T. et al., Optics Comm., 115 (1995) 99.
Embedded-mirror side-pumping: Koplou J. P., JQE 39, (2003) 529.
Angle-polished fibers: Larsen J. J., Opt. Lett. 29 (2004) 436.

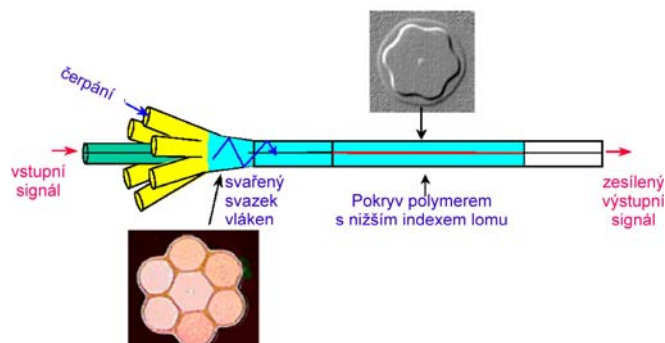


45

Způsoby navázání záření do vlákna

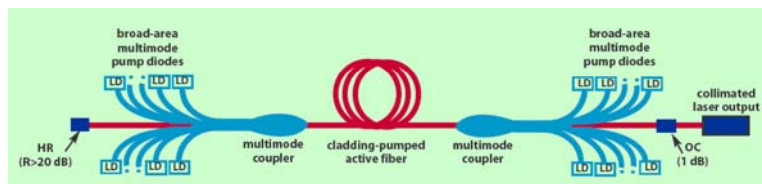
typ B) Lucent Technologies: "Star coupler"

D. J. DiGiovanni, U.S. patent #5,864,644.

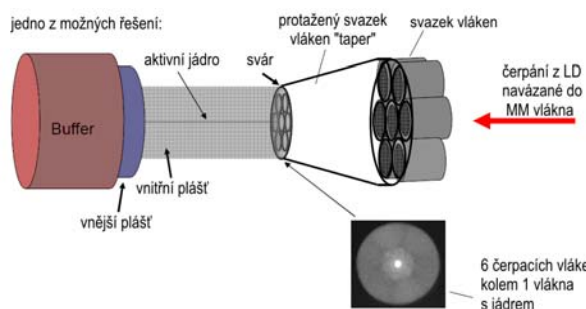


46

Způsoby navázání záření do vlákna - IPG



jedno z možných řešení:



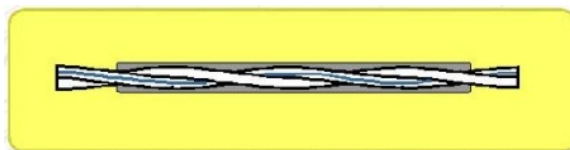
Valentin P. Gapontsev
1991, Ústav radiotechniky
a elektroniky,
Akademie věd SSSR

nyní hlavní vlastník firmy
IPG-Photonics
(USA, Německo, Rusko)

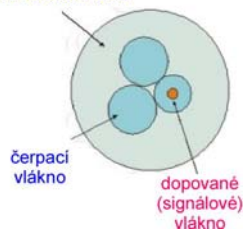
47

Způsoby navázání záření do vlákna

typ B) Southampton Photonics: "GT Wave" vlákno (vláknový svazek)



společný vnější plášť
s nižším indexem lomu

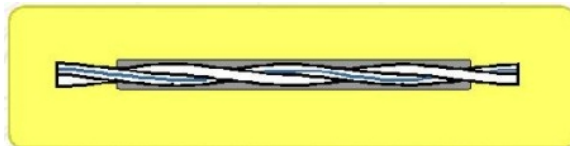


- několik vzájemně spletených holých vláken se společným vnějším pláštěm. Integrovaný vazební člen je vyráběn již při tažení vlákna
- jednoduchá konstrukce
- minimální vazba signálu do čerpacích vláken chrání čerpací diody
- "snadný" přístup k signálovému vláknu
- čerpání navázané do jednoho z vláken se šíří celým vláknovým svazkem

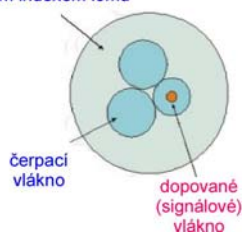
48

Způsoby navázání záření do vlákna

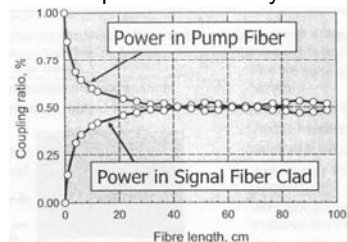
typ B) Southampton Photonics: "GT Wave" vlákno (vláknový svazek)



společný vnější plášť
s nižším indexem lomu



Vazba čerpání mezi vlákny svazku

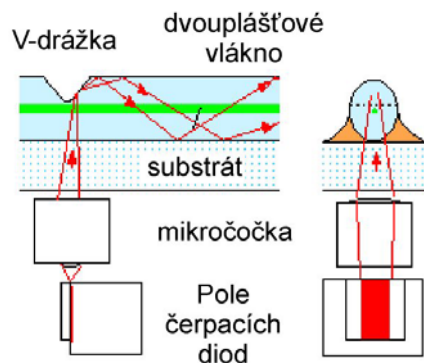


2-vláknový GTWave svazek, Interakční délka <50 cm

49

Způsoby navázání záření do vlákna

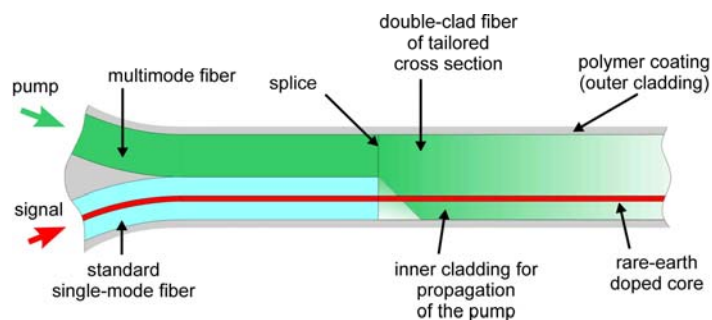
- typ C) boční čerpání V-drážkou
- V-groove side pumping (VSP)
-



- [Goldberg97] L. Goldberg, B. Cole and E. Snitzer, "V-groove side-pumped 1.5 μ m fibre amplifier", Electronics Lett., 33(25):2127-2129, 1997.
- [Dominic99] V. Dominic et al., "110W fibre laser", Electronics Lett., 35(14):1158-1160, 1999
- Keopsys (Francie), SDL, IMRA (USA)

50

Způsoby navázání záření do vlákna

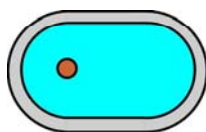


- Požadavky na tvar průřezu DC vlákna:
- 1. je co nejvíce podobný průřezu dvou vstupních vláken pro usnadnění sváru
- 2. zajišťuje optimální absorpci čerpání podél vlákna (chaotické trajektorie paprsků)

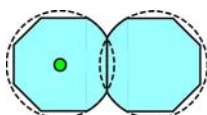
51

Příprava dvouplášťového vlákna

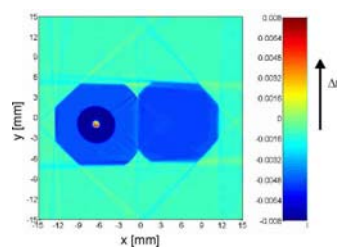
vybraný tvar průřezu "stadion"



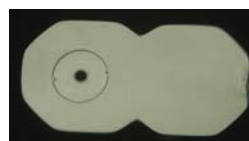
Realizace v praxi: spojení dvou preforem zbrošených po stranách



Tomografické zobrazení průřezu a profilu indexu lomu typické preformy

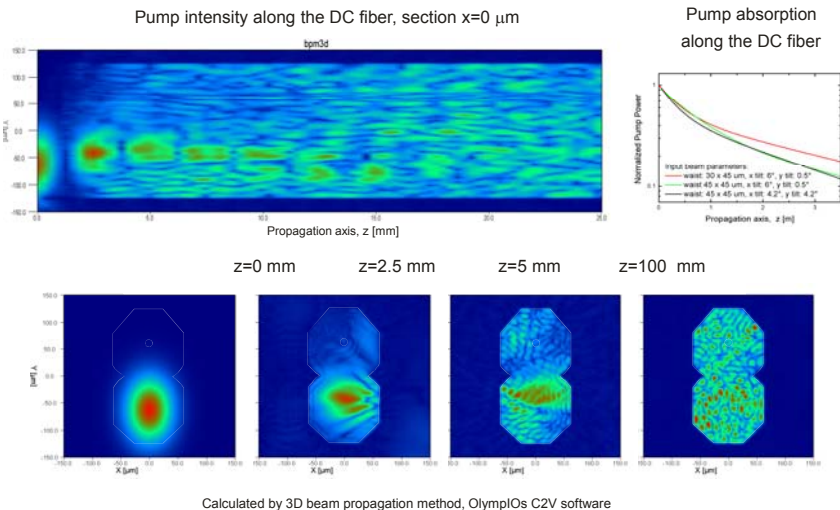


mikroskopická fotografie čela DC vlákna



52

Šíření čerpání ve vnitřním plášti



53

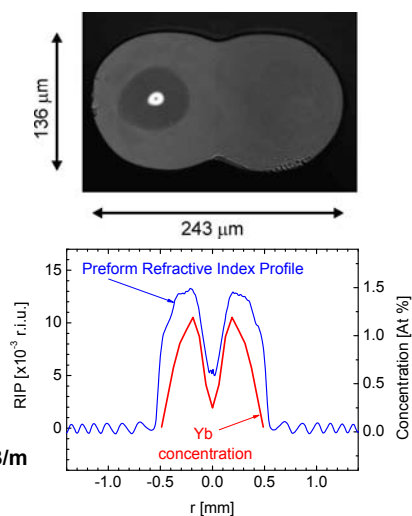
Vlastnosti Er/Yb dopovaného DC vlákna

Rozměry vnitřního pláště : $243 \times 136 \mu\text{m}$
 Materiál vnějšího pláště:
 polysiloxane polymer ($n \sim 1.41$) $\rightarrow$ $NA=0.37$
 a ochranný UV-vytvrditelný akrylát

NA jádra: 0.23, průměr jádra (avg.): $12 \mu\text{m}$
 $\rightarrow$ šíření čtyř modů na $\lambda = 1550 \text{ nm}$

Koncentrace: Er~600 ppm, Yb~12000 ppm
 (poměr Er:Yb $\sim 1:20$)

Absorpce Er na 1535 nm (jádro): 23 dB/m
 Absorpce Yb na 975 nm (plášť): 3.1 dB/m
 Ztráty pozadí (základní ztráty) vlákna: 0.1-0.2 dB/m



Vlastnosti Er/Yb dopovaného DC vlákna

Rozměry vnitřního pláště : 243×136 μm

Materiál vnějšího pláště:

polysiloxane polymer ($n \sim 1.41$) $\rightarrow$ NA=0.37
a ochranný UV-vytvrditelný akrylát

NA jádra: 0.23, průměr jádra (avg.): 12 μm

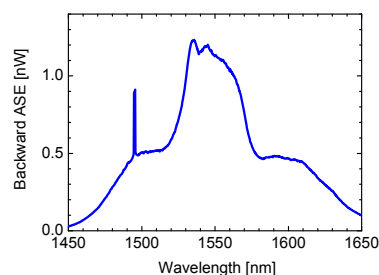
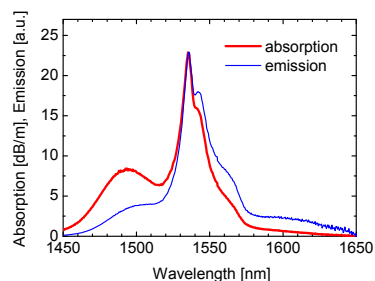
$\rightarrow$ šíření čtyř modů na $\lambda = 1550$ nm

Koncentrace: Er~600 ppm, Yb~12000 ppm
(poměr Er:Yb $\sim 1:20$)

Absorpce Er na 1535 nm (jádro): 23 dB/m

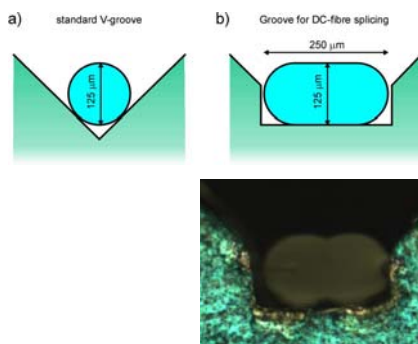
Absorpce Yb na 975 nm (plášť): 3.1 dB/m

Ztráty pozadí (základní ztráty) vlákna: 0.1-0.2 dB/m

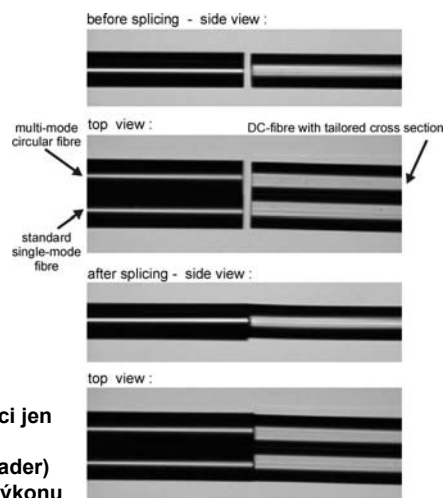


Sváření

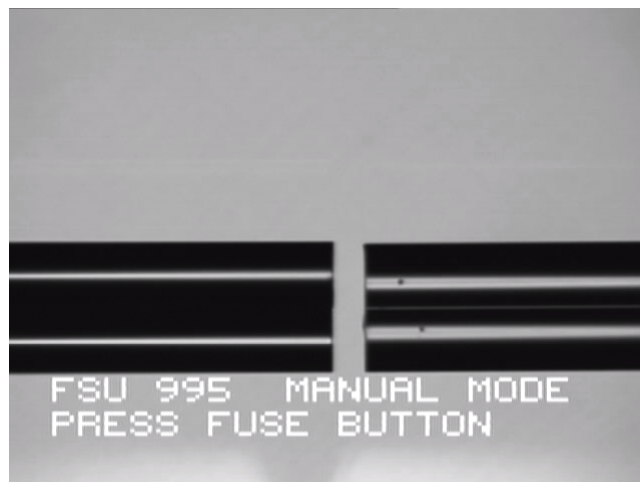
svářečka optických vláken: Ericsson FSU-995 FA
drážky pro snadné polohování vláken:



tvary dvou kruhových vláken a DC vlákna se přeci jen liší $\Rightarrow$ mírně snížené časy svařovacího oblouku
Ztráty se SMF: 1.2 dB (díky rozdílnému profilu jader)
a <0.1 dB s MMF. ~ 0.2 dB vzůst v přeneseném výkonu
(odstranění Fresnelových odrazů svárem)

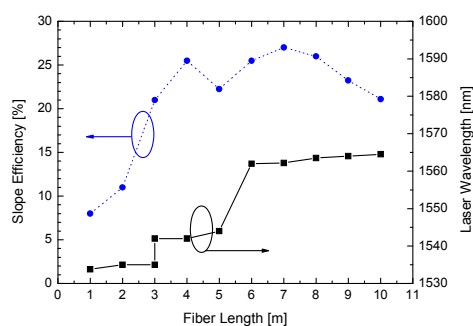
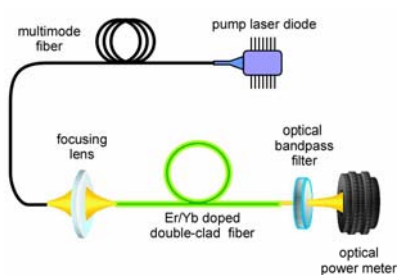


Sváření



57

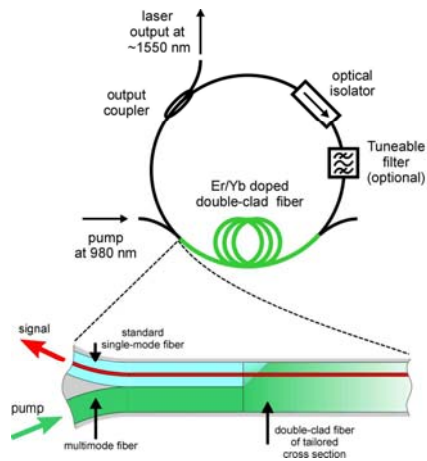
Fabryův-Perotův rezonátor



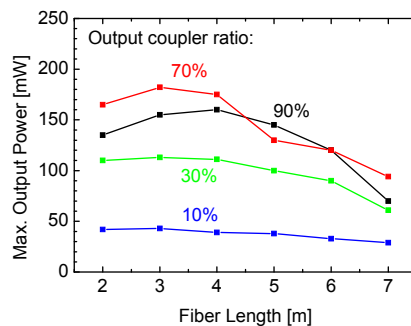
rezonátor laseru je tvořen kolmo zalomenými konci vlákna (odrazivost 3.5 %).
 Čerpání: MM laserová dioda s navázáním do vlákna, 1.3 W ve 100 μm jádře MMF,
 1.07 W v dvouplášťovém vlákně.

Maximální strmost 27% (slope efficiency), optimální čerpací vlnová délka 980 nm.

Kruhový rezonátor



Optimalizace délky dvouplášťového vlákna

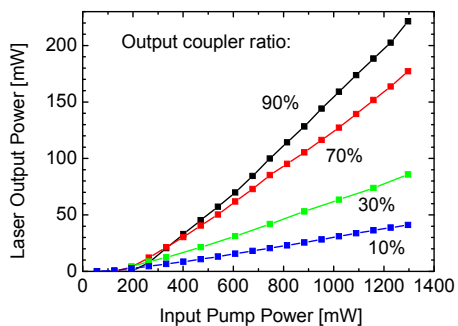


Optimální délka vlákna: 3.5 m.

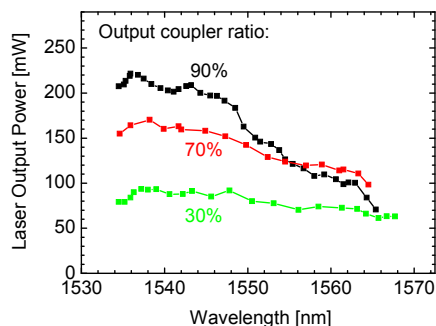
P. Peterka, I. Kasik, V. Matejec, V. Kubecek, and P. Dvoracek, Optics Letters 31 (2006), p. 3242.
 "End-pumping scheme improves fiber-based devices", Laser Focus World (December 2006).
 "End-Pumping Fiber Amplifiers Made Easy", Photonics Spectra (January 2007).

Kruhový vláknový laser s optimální délkou vlákna L=3.5 m

Laserové křivky pro různé výstupní děliče

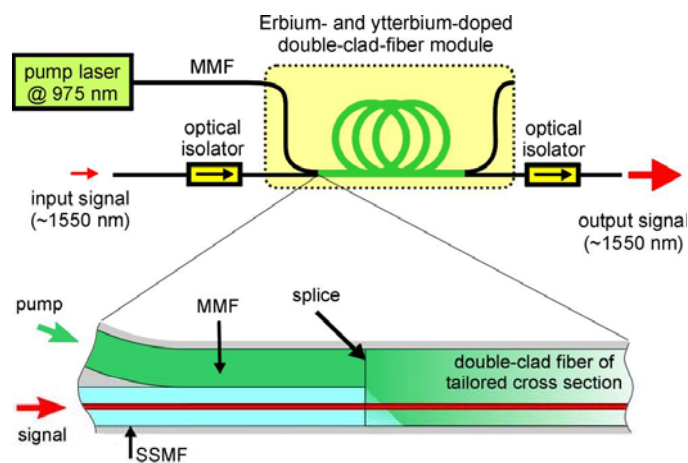


Přeladitelnost laseru



Maximální strmost 22.6% pro 90% výstupní vazení člen (PCE = 19%).

Vláknový zesilovač

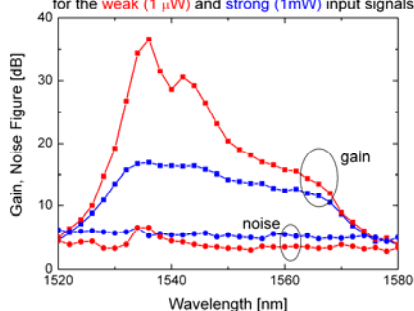


P. Peterka, I. Kašík, V. Matějce, M. Karásek, J. Kaňka, P. Honzátko, V. Kubeček, "Amplifier Performance ...", Optical Fiber Communication Conference OFC'07, paper JWA12, Anaheim, California, USA, March 25-29, 2007.

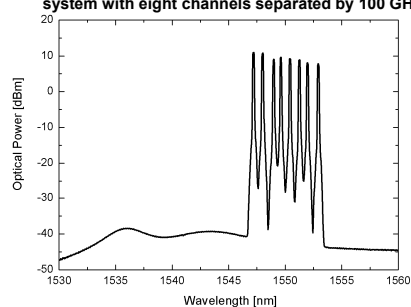
61

Vláknový zesilovač

Gain and noise characteristics of the experimental amplifier module for the weak (1 μ W) and strong (1mW) input signals



Demonstration of the amplifier performance in a WDM system with eight channels separated by 100 GHz.



Bylo dosaženo maximální malosignálové zesílení téměř 40 dB a výstupní výkon 22.6 dBm (186 mW) při relativně nízkém čerpání 1.3 W. Nejlepší šumové charakteristiky byly dosaženy pro malosignálový režim se sousměrným čerpáním. I pro velkosignálový režim bylo šumové číslo menší než 6 dB.

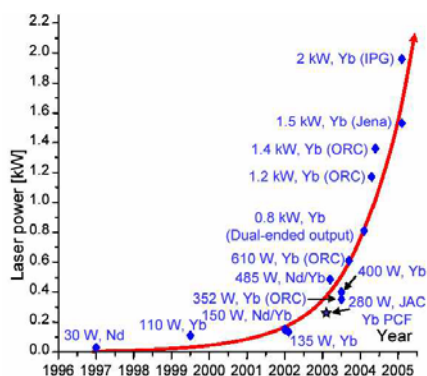
62

Limity výstupního výkonu kontinuálních vláknových laserů

Power scaling limits of continuous wave YDFL

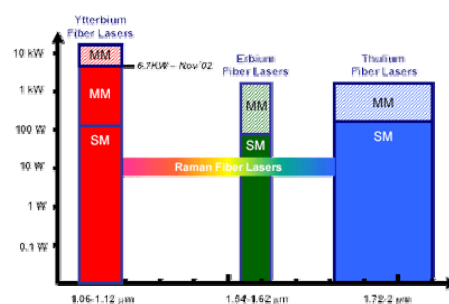
63

Pláštěm čerpané vláknové lasery



Pokroky ve zvyšování výstupního výkonu jednomódových Yb-vláknových laserů emitujících @1.1 μm .

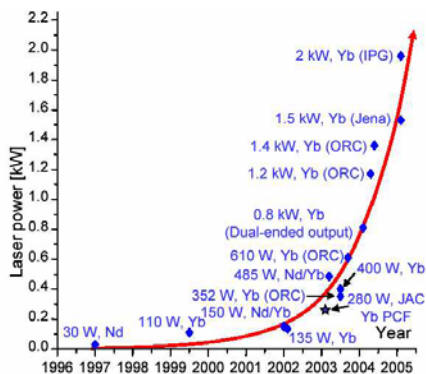
J. Nilsson, OAA'05, Budapest, August 7-10, 2005



Další dostupné vlnové délky výkonových vláknových laserů a jejich maximální dosažený výstupní výkon.

64

Pláštěm čerpané vláknové lasery



Kam až poroste výstupní výkon?

Jaké jsou limity Yb vláknových laserů?

Pokroky ve zvyšování výstupního výkonu jednomódových Yb-vláknových laserů emitujících @1.1 μm .

J. Nilsson, OAA'05, Budapest, August 7-10, 2005

65

Výkonová omezení Yb vláknových laserů

Optické poškození průrazem dielektrika.

Rovinná vlna v křemenném skle: $I_{\max} = \frac{E_p^2}{2Z}$, $Z = \frac{Z_0}{2n}$, $Z_0 = 377 \Omega$

$E_p = 30 \times 10^6 \text{ V/m}$, $I_{\max} = 1.7 \text{ W}/\mu\text{m}^2$, v opt. vlákne $I_{\max} = 3\text{-}20 \text{ W}/\mu\text{m}^2$
 $I \approx P_{\text{out}}/A_{\text{eff}} \rightarrow$ čím větší jádro, tím lépe.

Tepelná zátěž, typicky $p_{\text{thermal}}^{\max} = 100 \text{ W/m}$ při vzduchovém chlazení, bylo demonstrováno až 200 W/m při vylepšeném odvodu tepla. Čím větší tím lépe. Slabé místo - polymerní pokryv. Možnost prodloužit vlákno není neomezená.

nelineární jevy (Ramanovo a Brillouinovo zesílení),

generace neužitečného záření na úkor signálu.

Např. přijatelný Ramanovský zisk je $G_R^{\max} = 3\text{-}10 \text{ Np}$ (13-43 dB)

$G_R = g_R P_{\text{out}} L_{\text{eff}}/A_{\text{eff}}$, $g_R = 0.5 \times 10^{-13} \text{ m/W}$, $L_{\text{eff}} \approx L/2$ čím kratší vlákno, tím lépe.

$G_R^{\max}$ závisí na návrhu rezonátoru, zpětnou vazbu lze pro Stokesovu složku potlačit.

J. Nilsson, Optical Fiber Communication Conf. OFC'05, Anaheim, California, short course SC290, 25 March 2007.

66

Výkonová omezení Yb vláknových laserů

Absorpce čerpání. Celková absorpce čerpání alespoň $\alpha_p^{\text{tot, min}} = 3 \text{ Np}$ (13 dB).
Dosažitelná absorpce v jádře $\alpha_p^{\text{core}} = 2000 \text{ dB/m}$ (fosfosilikátová skla) @975 nm.
 $\alpha_p^{\text{core}} = 500 \text{ dB/m}$ (aluminosilikátová skla) @975 nm.

Čím větší α_p^{core} tím lepší.

Při velkých koncentracích problém s jevem photo-darkening, párovým zhášením.

Jiné dopanty: 100 dB/m (Nd), 1000 dB/m (Tm @790 nm)

jen 50 dB/m (Er) @980nm, proto je nutná sensitizace yterbiem

S rostoucí koncentrací dopantů se zvyšují základní ztráty vlákna.

Základní ztráty (background loss, BG):

Akceptovatelné celkové ztráty jsou $\alpha_{\text{BG}}^{\text{tot, max}} = 0.2 \text{ Np}$ (0.86 dB, 18% single pass loss). Čím menší tím lepší.

Dosažitelné základní ztráty: $\alpha_{\text{BG}} = 0.005 \text{ Np/m}$ (0.022 dB/m).

Účinnost

Výkonová konverzní účinnost Yb laserů 0.7-0.9, typicky 0.8.

67

Výkonová omezení Yb vláknových laserů

Navázaný čerpací výkon

Typická intenzita čerpacích diod $3 \text{ mW}/\mu\text{m}^2$

Pokročilá technologie diod & vnitřní plášť s velkou NA → až $10 \text{ mW}/\mu\text{m}^2$

celoskleněné vlákno: NA 0.2-0.3 → vyžaduje diody s velkou zářivostí

vlákno s polymerním vnějším pláštěm: NA 0.4-0.5 (ale problémy s tepelným poškozením)

mikrostrukturní vlákno (air-clad): efektivní NA 0.6-0.8 (nominální 1.1)

velikost vnitřního pláště čím větší, tím více čerpacího záření lze navázat.

Ale snižuje se tím absorpce, protože $\alpha_p \approx \alpha_p^{\text{core}} A_{\text{core}}/A_{\text{clad}}$.

Vlákna silnější než 1 mm lze těžko ohýbat (a vyrábět)

délka vlákna parametr, který lze nejnázne měnit.

Dlouhé vlákno zvyšuje absorbovaný čerpací výkon, zlepšuje tepelnou zátěž (thermal management - jedna z hlavních výhod vláknových laserů!)

Kratší vlákno naopak potlačuje nelineární jevy, snižuje základní ztráty a tedy zvyšuje účinnost laseru. Max. délka Yb vlákna je cca 30 m.

68

Výkonová omezení Yb vláknových laserů

$$2 \frac{\eta p_{\text{thermal}}^{\text{max}} \alpha_{\text{BG}}^{\text{tot,max}}}{\alpha_{\text{BG}} \alpha_p^{\text{tot,min}} (1-\eta)}$$

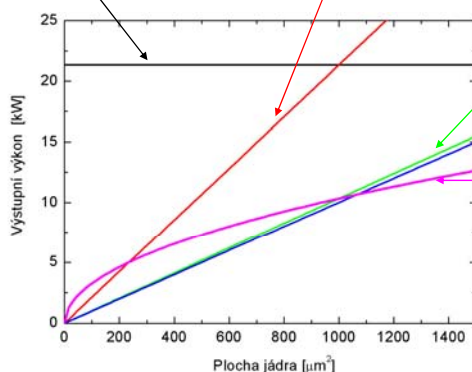
ztráty & odvod tepla

$$2 \frac{\eta I_p^{\text{max}} A_{\text{dop}} \alpha_p^{\text{core}} \alpha_{\text{BG}}^{\text{tot,max}}}{\alpha_{\text{BG}} \alpha_p^{\text{tot,min}}}$$

ztráty & navázané čerpání

$$\sqrt{\frac{2(L/L_{\text{eff}})\eta I_p A_{\text{dop}} A_{\text{eff}} G_R^{\text{max}} \alpha_p^{\text{core}}}{g_R \alpha_p^{\text{tot,min}}}}$$

Raman & navázané čerpání



S těmito parametry omezuje max. výkon optické poškození.
Ale: pro menší h (Er/Yb, Tm) může dominovat odvod tepla, ...

$I_{\text{max}}/A_{\text{eff}}$ Optické poškození

$$\sqrt{\frac{2(L/L_{\text{eff}})\eta p_{\text{thermal}}^{\text{max}} A_{\text{eff}} G_R^{\text{max}}}{g_R (1-\eta) \alpha_p^{\text{tot,min}}}}$$

Raman & odvod tepla

$A_{\text{eff}} = A_{\text{dop}} = A_{\text{core}}$ (nez. proměnná v grafu)

$I_{\text{max}} = 10 \text{ W}/\mu\text{m}^2$

$I_p = 10 \text{ mW}/\mu\text{m}^2$

$\eta = 0.8$

$p_{\text{thermal}}^{\text{max}} = 200 \text{ W/m}$

$G_R^{\text{max}} = 5 \text{ Np (22 dB)}$

$g_R = 0.5 \times 10^{-13} \text{ m/W}$

$\alpha_p^{\text{tot,min}} = 3 \text{ Np (13 dB)}$

$\alpha_{\text{BG}}^{\text{tot,max}} = 0.2 \text{ Np (0.87 dB)}$

$\alpha_{\text{BG}} = 0.005 \text{ Np (0.02 dB)}$

$L/L_{\text{eff}} = 2$

69

Zvyšování výkonu a zářivosti (jasu) spojováním svazků

Power and brightness scaling via beam combination

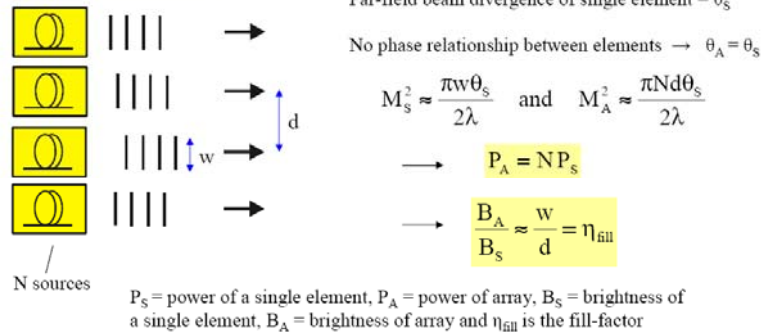
70

Introduction

Scaling the output power and radiance beyond the upper limit for a single fiber core can be achieved via the use of multiple fiber sources or a multi-core fiber source and beam combining¹. Beam combining schemes fall into one of two categories:

(a) Incoherent beam combining:

Spatial beam combining

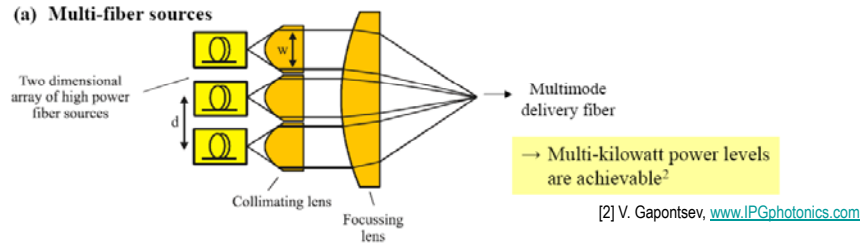


71

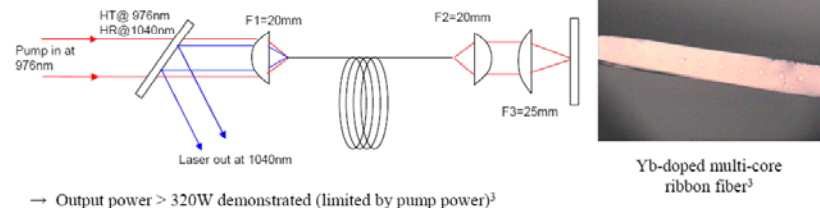
$\rightarrow$ Simple and robust way to scale output power, but brightness cannot exceed the brightness of a single element

Examples:

(a) Multi-fiber sources

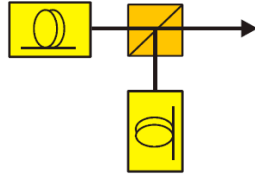


(b) Multi-core fiber sources



72

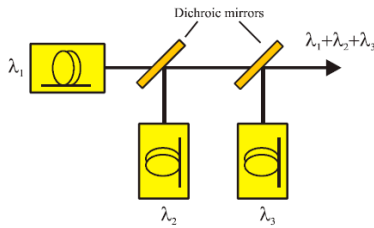
Polarization beam combining



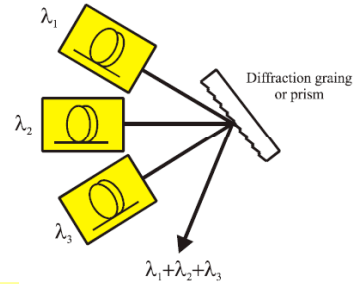
$$B_A = 2\eta_c B_S$$

where η_c is the combining efficiency, which takes into account loss and misalignment

Wavelength beam combining



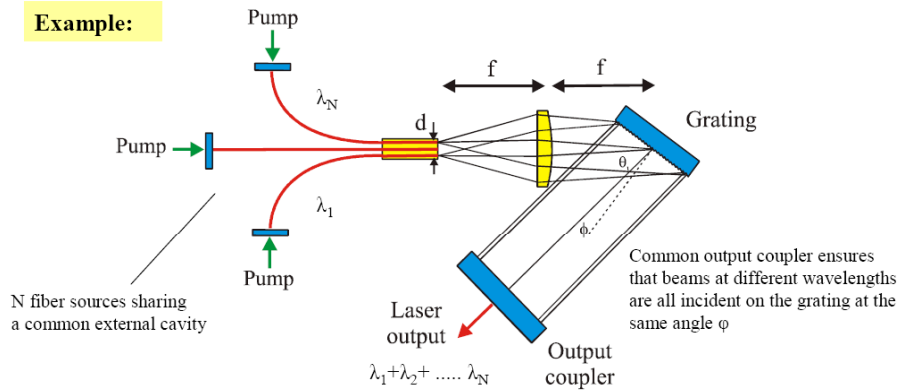
or



$$B_A = N\eta_c B_S$$

73

Example:



Spacing between 1st and Nth fiber cores = d , grating period = Λ , spacing of adjacent cores = s

Wavelength for i^{th} fiber laser: $\lambda_i = \Lambda(\sin \theta_i + \sin \phi)$ and dispersion of grating: $d\theta/d\lambda = 1/(\Lambda \cos \theta)$

→ Wavelength spread for fiber laser array: $\Delta\lambda_A = \Lambda d[(\cos \theta)/f] \leq \Delta\lambda_L$

where $\Delta\lambda_L$ is the gain bandwidth for the transition and can be quite large ($>100\text{nm}$) in a glass host

74

→ Power scaling limit $\approx P_s \Delta\lambda_L / \Delta\lambda_s$

where P_s is the power of a single element

This approach has been used to combine diode² and fiber laser arrays^{3,4}. For the latter, power levels of >100W have been realised for an array of three cladding-pumped Yb-doped fibers using a fused silica transmission grating as the dispersive element⁴.

Main challenges for power and brightness scaling:

- Accurate positioning of fiber cores in a linear array to avoid degradation in beam quality
- Lens design – Minimising degradation in beam quality due to aberrations
- Dispersive element design – Good wavelength discrimination, high efficiency, thermal handling
- Tight alignment tolerances

75

Využití vláknových laserů

- ◆ optické komunikace:
 - zdroje signálu
 - vláknové zesilovače
 - testování optických komponent
 - měření chromatické disperze
- ◆ zdroje pro Ramanovskou spektroskopii
- ◆ aplikace v medicíně
- ◆ zpracování materiálu (řezání, sváření, značkování ...)
- ◆ LIDAR – Light Detection And Ranging

76

Slunce:

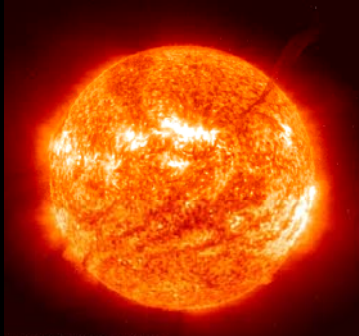
teplota slunečního povrchu: 5780 K

Stefan-Boltzmannův zákon:

$$I = \sigma T^4 \text{ [W/m}^2\text{]} \rightarrow$$

Intenzita světla na slunečním povrchu:

$$I = 63 \text{ MW/m}^2$$



Optické vlákno:

při optickém výkonu 1 W v optickém vlákně $\rightarrow$

intenzita světla v jádře optického vlákna: 12.7 GW/m²

cca **200 x** více než na Slunci



útlum optického vlákna:

0,16 dB/km, tj. ztráta 3,6%

přenášeného výkonu na 1 km vlákna

při úplné absorpci v materiálu tloušťky 1 mm je materiál za 1 s teoreticky ohřát o $\Delta T = \Delta Q / (c \cdot m) = 3.6$ miliónu K $\rightarrow$ odpařování materiálu, řezání

Zpracování materiálů

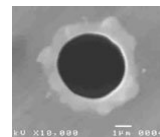
dekorativní rytí



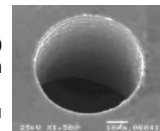
značkování a popisování výrobků



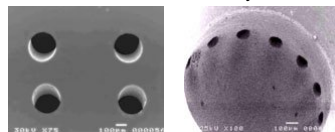
Děrování, od 1 Øm
5 Øm otvor v
ocelovém plechu



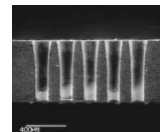
Trepanování
(výřezávání)
děr, od 20µm
50 µm otvor v
ocelovém plechu



Vrtání a tvarování vstřikovacích trysek pro
benzínové a dieselové motory

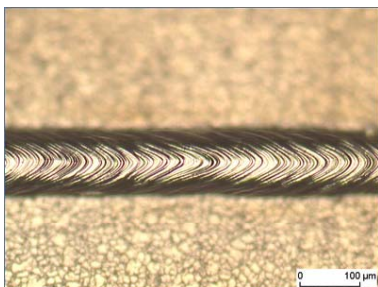


Rozšiřující se
otvory –
125 µm díry
v hliníku

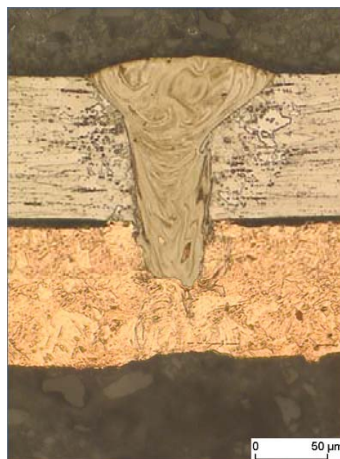


Svařování

svár shora



řez svárem



79

Zpracování materiálu

svařování a řezání v automobilovém a loďařském průmyslu
řezání 4 cm tlusté ocelové desky v loďařském průmyslu
Vláknový laser P < 2 kW, LASOX



80

Zpracování materiálu

řezání 10 cm silné betonové desky (4 kW @ 1.1 μm)



81

Zpracování materiálu

Stávající technologie pro průmysl:

CO₂ plynový laser: max. výkon až 20kW, účinnost až 10 %,

výhody: vysoká absorpce v materiálech, eye-safe,

nevýhody: problémy s dopravou svazku na místo.

pevnotátkové lasery čerpané výbojkami (Nd:YAG), výkon 20W až 4kW, účinnost 2-4%,

výhody: možnost použití optických vláken pro transport svazku.

nevýhody: nižší absorpce v materiálech, pro povrchové svařování je lepší.

Životnost výbojek cca 1000 h.

Náhrada výbojkami čerpaných pevnolátkových laserů:

Diodami čerpané krystaly, disky: výkon až 4 kW, účinnost 10-20%, pokročilá životnost čerpacích diod 20x větší než výbojek, pokročilá technologie, blízko k nasazení v praxi.

Vláknové lasery, nyní až 20 kW, účinnost 25%, jednoduchost, modulární uspořádání → možnost dalšího zvyšování výkonu, kompaktnost (není nutné vodní chlazení), neobsahuje optické prvky, které potřebují nastavovat, nebo pohyblivé součásti → vysoká spolehlivost a malá údržba. Ale jsou teprve ve stádiu vývoje

82

LIDAR

LIDAR (LIght Detection And Ranging)

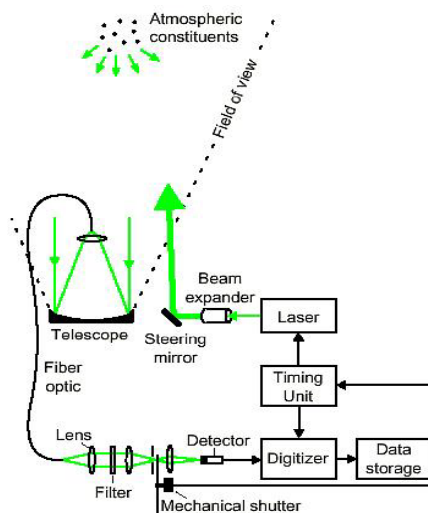
– optický RADAR

Stejně jako RADAR vysílá signál (optický) k cíli, je od něho odražen (rozptýlen) a detekován. Doba mezi vysláním signálu a jeho detekcí je úměrná vzdálenosti mezi vysílačem a objektem.

vzdálenost objektu =
(rychlost světla x doba šíření) / 2

Přesnost stanovení vzdálenosti souvisí s délkou impulsu:

$$\Delta L = c \times \Delta t \quad (1 \text{ ns} \Rightarrow 0.3 \text{ m})$$



83

LIDAR

Typy LIDARů:

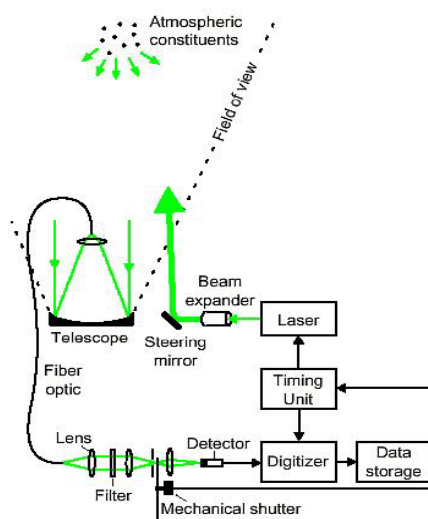
Dálkoměry netradiční aplikace –

- měření vzdálenosti družic (FJFI)
- topografie zemského povrchu (monitorování eroze, růstu stromů)

DIAL (Differential Absorption Lidar)

měření koncentrací chemických prvků v atmosféře (ozón, vodní páry, znečištění). Dvě λ , jedna absorbována silně, referenční málo

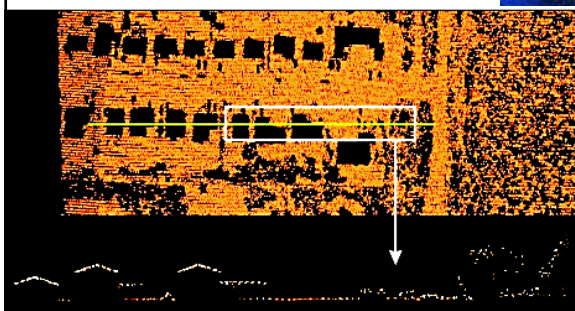
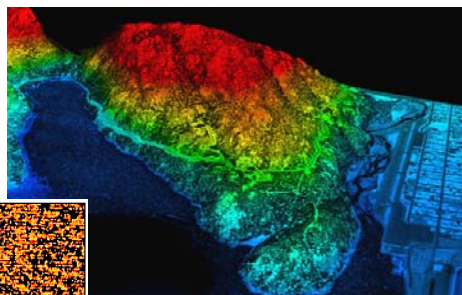
Dopplerovský lidar měření rychlosti objektu. Světlo rozptýlené od přibližujícího se objektu vykazuje modrý posuv, od vzdalujícího se červený posuv frekvence. Měření rychlosti rychlosti větru, turbulencí před letadly (vláknové lasery!).



84

LIDAR

topografie zemského povrchu



městská krajina
první odraz – od stromů
poslední odraz –
od zemského povrchu

85



Ústav fotoniky a elektroniky
Akademie věd České republiky



Chaberská 57, 182 51 Praha 8 - Kobylisy

www.ufe.cz
peterka@ufe.cz

86