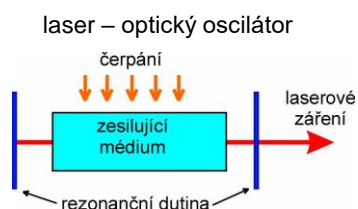


Obsah

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

1

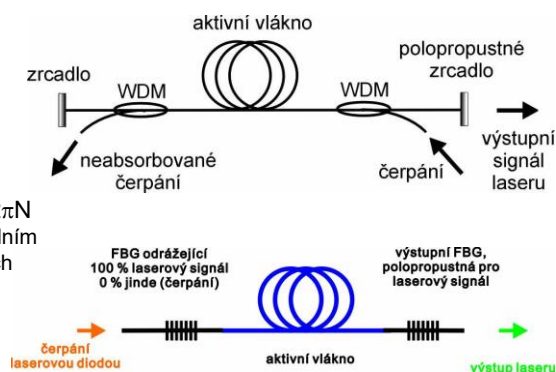
Kontinuální vlákňové lasery



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. $L = 10 \text{ m} \rightarrow \Delta\nu = 10 \text{ MHz}$.
(srv. InGaAsP laser $\lambda = 1300 \text{ nm}$:
 $L = 300 \mu\text{m} \rightarrow \Delta\nu = 142 \text{ GHz}$,
resp. $\Delta\lambda = \lambda^2 \Delta\nu / c = 0,8 \text{ nm}$.)

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

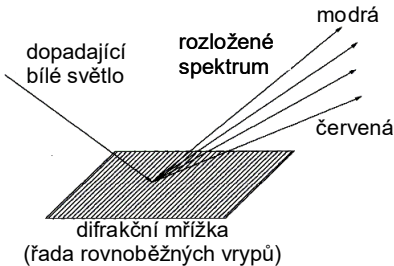


2

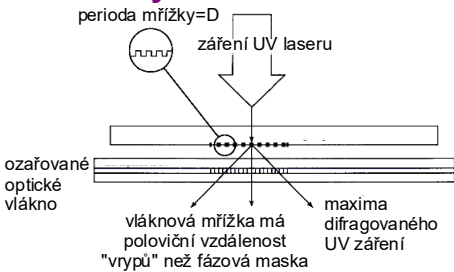
Braggovské vláknové mřížky

Fiber Bragg Grating (FBG)

standardní mřížka s vrypy

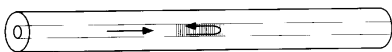


výroba FBG



vláknová Braggovská mřížka

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



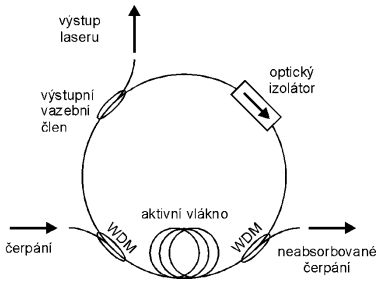
srv. mřížka s dlouhou periodou (long-period grating, LPG)



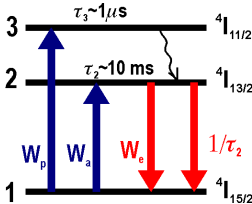
3

Kontinuální vláknové lasery

2. uspořádání rezonátoru: kruhový rezonátor



Vzdálenost podélných módů kruhového rezonátoru $\Delta \nu = c_0 / (nL)$, $\Delta \nu = 10 \text{ MHz}$ pro $L = 20 \text{ m}$.



rychlostní rovnice:

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

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

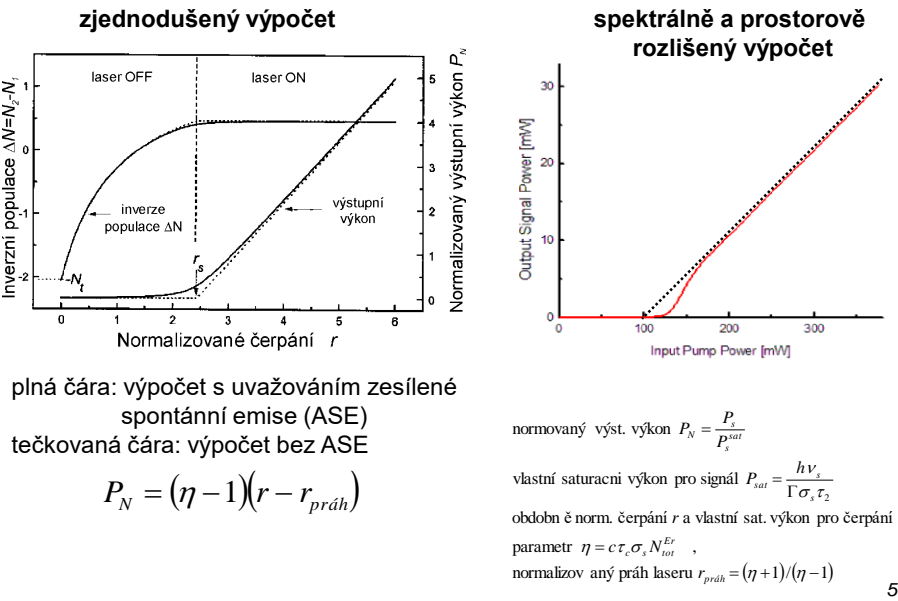
$$W_e = \frac{\sigma_e \Gamma P_s}{h \nu_s}, W_a = \dots, W_p = \dots,$$

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

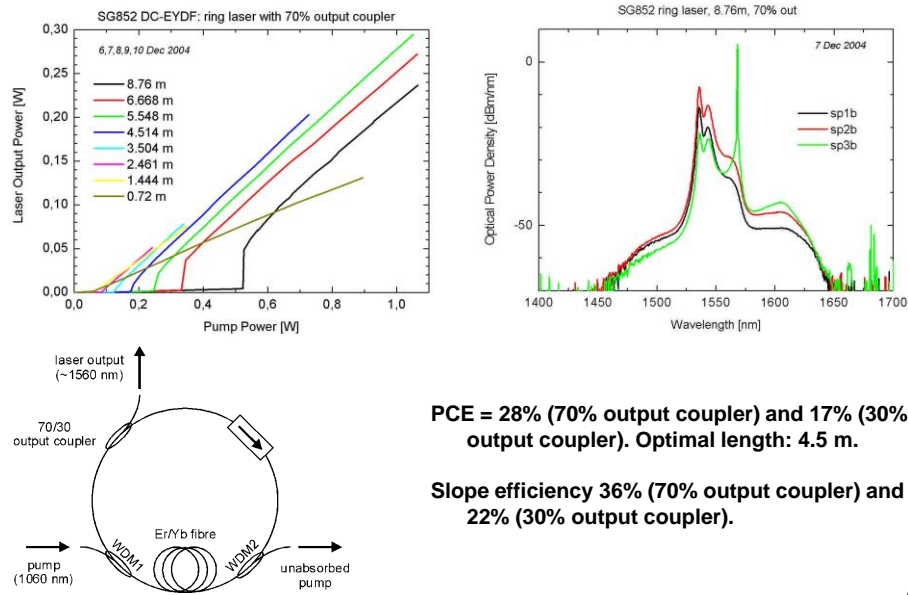
$$\frac{dP_s}{dt} = (N_2 - N_1) c \sigma_s \Gamma P_s - \frac{P_s}{\tau_c} + sp.em.$$

tj. propagační rovnice vynásobená c okrajové podmínky popisuje $\tau_c = \frac{2L}{c(2\alpha L - \ln R_1 R_2)}$

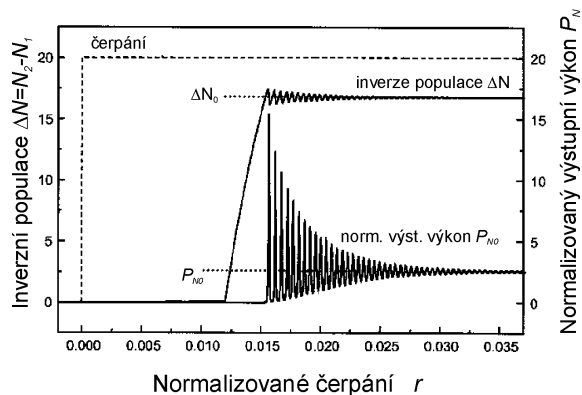
Kontinuální vláknové lasery – ustálený stav



Kontinuální vláknové lasery – ustálený stav



Kontinuální vláknové lasery – relaxační oscilace



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

$$\text{kruhová frekvence relaxacních oscilací } \omega = \sqrt{\frac{\eta+1}{\tau_2\tau_c}(r-r_{práh})} \quad \eta = c\tau_c\sigma_s N_{tot}^{Er}$$

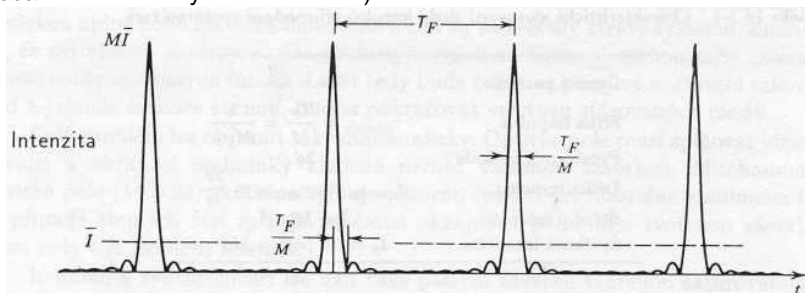
7

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)

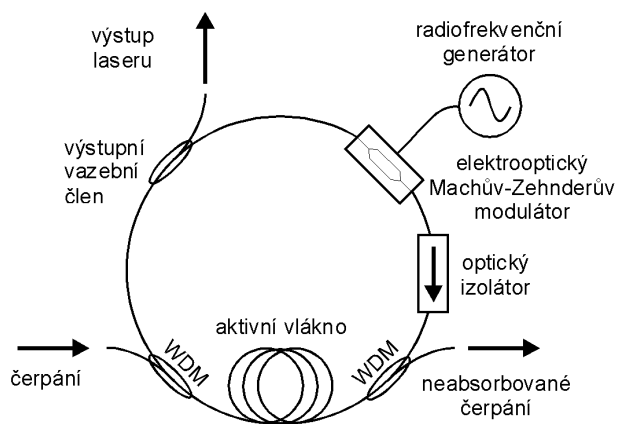


B. E. A. Saleh a M. C. Teich, "Základy fotoniky", kapitola 14: Lasery, Matfyzpress 1995

první experimenty (oba Bell labs): Hargrove et al., *Appl. Phys. Lett.* 1964, M. DiDomenico, *J. Appl. Phys.* 1964
teorie (nezávisle na exp.) již dříve: Willis E. Lamb Jr., Theory of an optical maser, *Phys. Rev.* 134, A1429-A1450, 1964

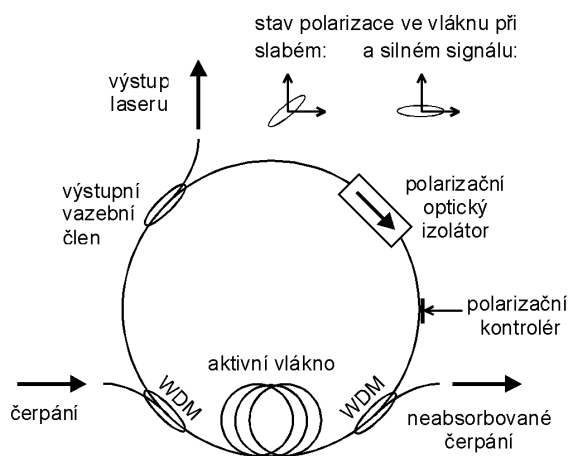
8

Aktivní modová synchronizace



9

Pasivní modová synchronizace



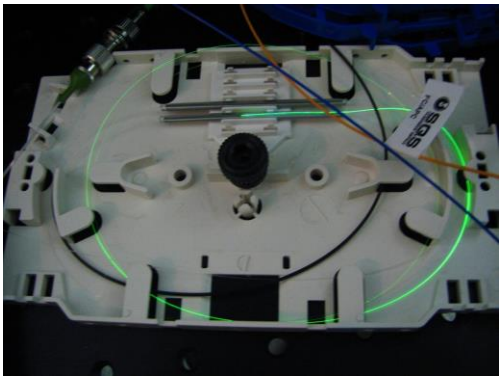
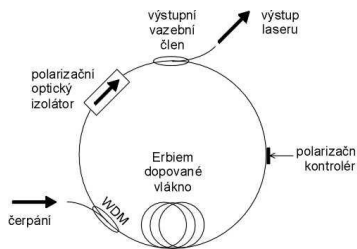
10

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 @1530 nm=80 dB/m
cutoff < 980 nm



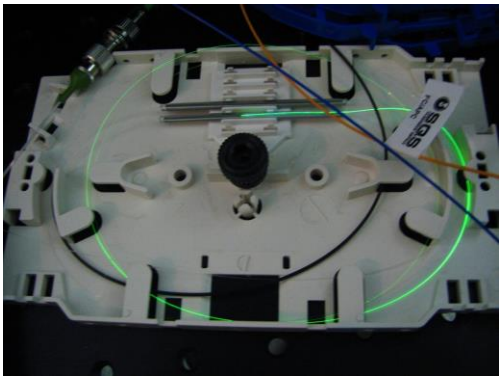
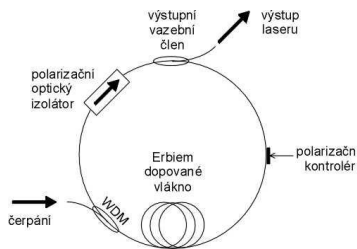
11

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**

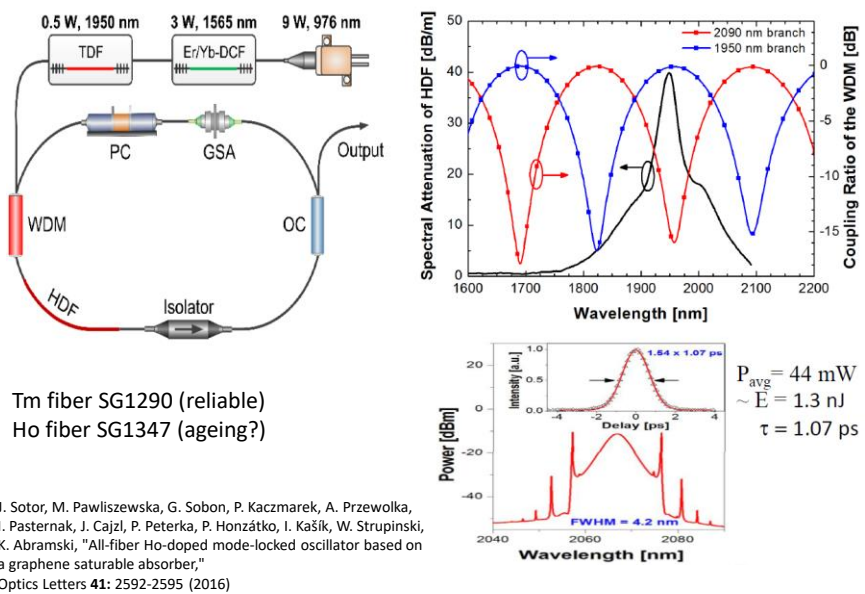


Liekki Er80 4-125, price per 1m	4 583 Kč
polarization controller OZ-optics	9 464 Kč
LD @ 980nm, 300mW, Furukawa-Fitel 2002	42 588 Kč
WDM 980/1550 Opneti China	1 893 Kč
isolator Opneti China	2 011 Kč
fs vláknový laser bez elektroniky	19 844 Kč



12

Mode-locked fiber laser using graphene saturable absorber



13

Měření času

Sluneční hodiny, 3500 př.n.l.

Jedna perioda za den

Krystalové hodiny, od 1918

32.768 period za sekundu

Hodiny = Oscilátor + čítač

kyvadlové hodiny, od r. 1656

jedna perioda za sekundu

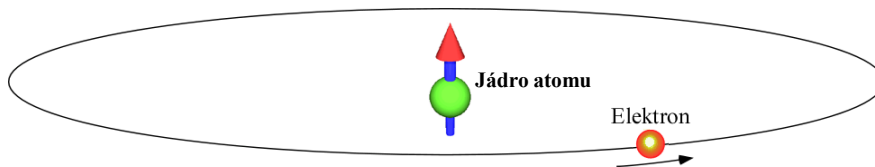
cesťové atomové hodiny, od r. 1955

9.192.631.770 period za sekundu

<http://www.mpq.mpg.de/~haensch/>

14

Další pokrok - optické atomové hodiny



Přechodem mezi dvěma kvantovými stavy elektronu získáme elektromagnetické pole, světlo, které kmitne skoro **milión miliardkrát za sekundu !**



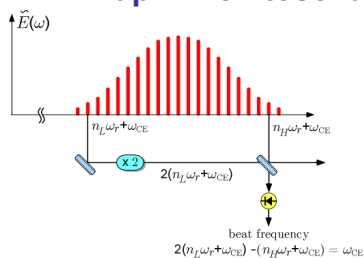
Jak spočítat kmity v optické oblasti ?

<http://www.mpg.de/~haensch/>

meze elektronických čítačů ~100 GHz

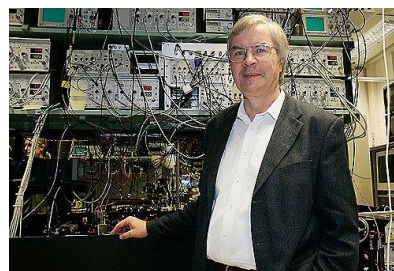
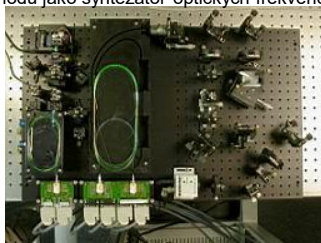
15

Metoda optického frekvenčního hřebene např. z femtosekundového vláknového laseru



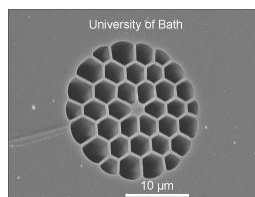
f_r ... laser repetition rate (~10 MHz.. 1GHz) measured with photodiode
 f_{CE} ... carrier-envelope offset due to phase and group velocity mismatch in the ML laser cavity, $\omega_{CE} = (1/N_g - 1/N_p) \omega_c$

erbiový vláknový laser se synchronizací
 módů jako syntezátor optických frekvencí



Theodor Hänsch - Nobelova cena za fyziku 2005
 Institut Maxe Plancka pro kvantovou optiku
 Garching u Mnichova

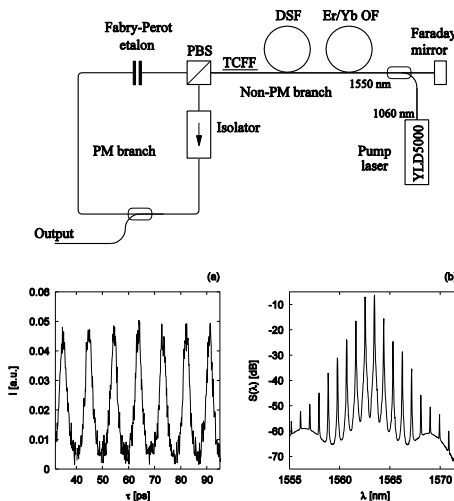
<http://www.mpg.de/~haensch/>



Fotonické krystalové vlákno
 umožňuje rozšířit spektrum
 laseru takže přesahuje oktávu

16

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**

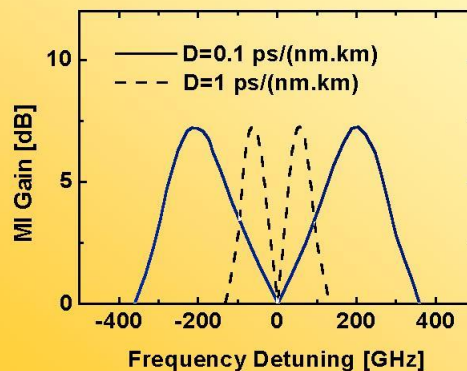
MI laser s TCF:

$f=206$ GHz, šířka pulsu: **2.7 ps**

17

Modulational-instability (MI) based fiber laser

MI can be induced by SPM in the anomalous dispersion regime, where a quasi-monochromatic signal spontaneously tends to generate two symmetric spectral sidebands



$$\nu_{\max}^2 = \frac{1}{2\pi^2} \frac{\gamma P_0}{|\beta_2|}$$

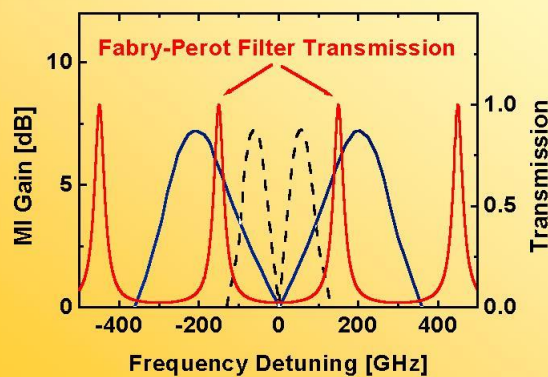
P. Franco, *et al.*, “Self-induced MI laser,” Opt. Lett., 20(19):2009, 1995.

Photonics Prague 2002, 26-29 May 2002

Modulational-instability (MI) based fiber laser

E. Yoshida and M. Nakazawa, „Low-threshold 115-GHz cw modulational instability erbium-doped fiber laser,“ *Opt. Lett.* 22(18):1409, 1997

P. Honzatko, *et al.*, Modulational-instability σ -resonator fiber laser, *Opt. Lett.* 26(11):810, 2001.



Photonics Prague 2002, 26-29 May 2002

Q-klíčované vláknové lasery

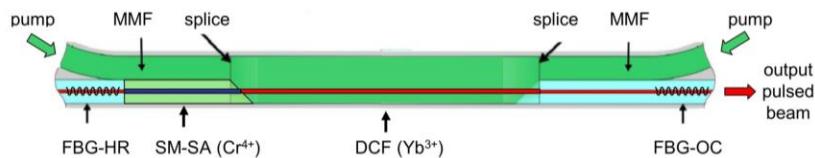


Fig. 2: example of linear Fabry-Perot PQS fibre laser based on the Yb³⁺:Cr⁴⁺ atomic system. DCF: Yb³⁺-doped ovale double-clad fibre; SM-SA: Cr⁴⁺-doped singlemode saturable absorber; MMF: pump carrying multimode fibre; FBG-HR: highly reflecting fibre Bragg grating mirror; FBG-OC: fibre Bragg grating output coupler. Note that the SM-SA could also be located just before the FBG-OC.

Další metody pasivního Q-klíčování: Carbon nanotubes, SESAM

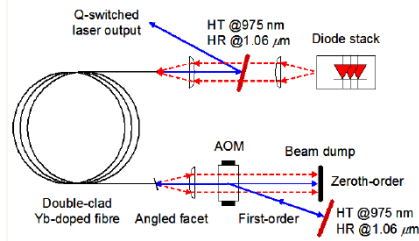
High-power Q-switched Yb-doped fiber lasers

Extractable energy⁶:

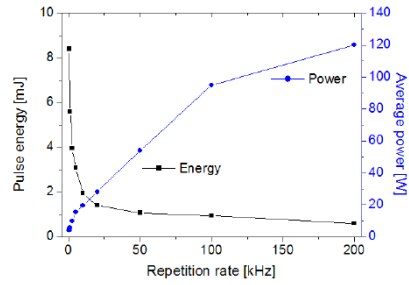
$$E_{\text{ext}} = h\nu_L A_{\text{co}} \left[\int_0^l N_2(z) dz - \frac{N/\sigma_s(\lambda_L)}{\sigma_e(\lambda_L) + \sigma_s(\lambda_L)} \right]$$

As a very rough guide, the extractable energy stored in a fiber is limited by ASE to around ten times the saturation energy $E_{\text{sat}} \approx h\nu_L A_{\text{co}} / [\sigma_s(\lambda_L) + \sigma_e(\lambda_L)] \eta_L$. In other words, the upper-limit on pulse energy is determined mainly by the core area. E_{ext} is ~2 - 5mJ for typical Yb-doped fiber with a 20μm 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 = 460ns
0.6 mJ @ 200 kHz (120 W)
Beam quality $M^2 \sim 4$



Shorter pulse durations can be achieved using a shorter fiber⁸

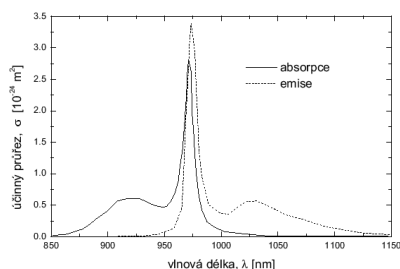
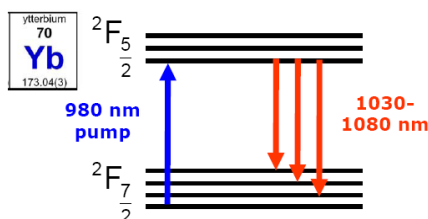
21

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

22

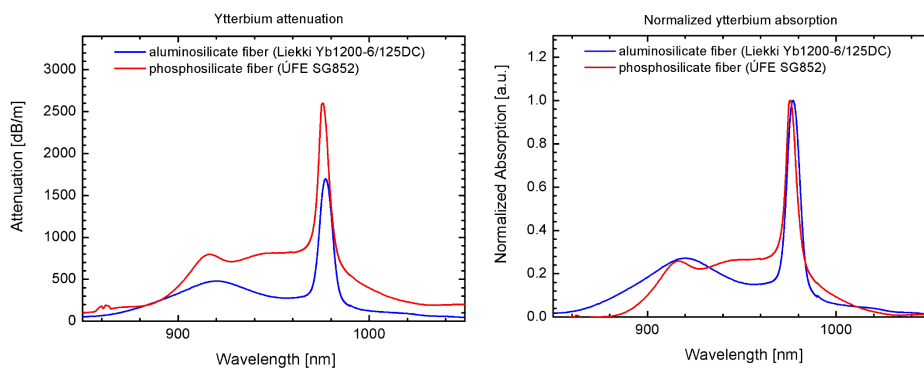
Yterbium

- malý kvantový defekt → malá tepelná zátěž
- jen dvě energetické hladiny → žádná ESA
- $^2F_{5/2}$ a $^2F_{7/2}$ jsou dostatečně vzdálené a nejsou mezi nimi jiné hladiny →
- absence nezářivých přechodů → 100% kvantová účinnost
- silný a široký absorpční pás @980 nm → vhodné po čerpání přes plášť
- typické vlnové délky Yb vláknových laserů: 1060-1130 nm „Yb C-band“ (conventional band)
- Yb systém se chová jako kvazi čtyřhladinový (resp. tříhladinový, @~980 nm) laser s fluorescenční obou života ~800 μ s



23

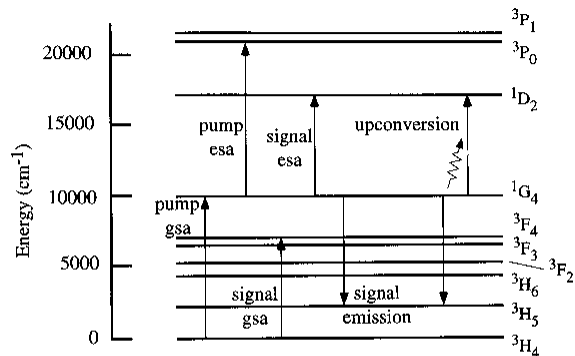
Yterbium



Absorpční spektra Yb ve fosfosilikátovém a aluminosilikátovém skleněném vlákne

24

Praseodym Praseodymium-doped fiber amplifier (PDFA)



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

Figure 10.16: Radiative and energy transfer processes of Pr^{3+} , included in an extended model of amplification at $1.3 \mu m$ 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.

25

Praseodymem dopovaným vláknový zesilovač (PDFA)

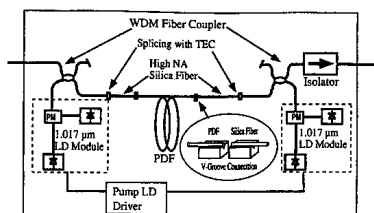


Figure 10.8: Configuration of a four-laser diode pumped the Pr^{3+} -doped fiber amplifier module. From reference [8] (©1993 IEEE).

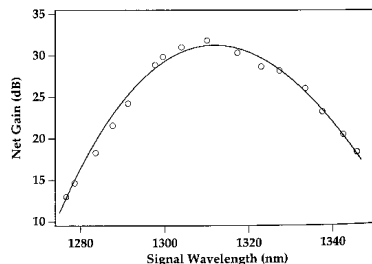


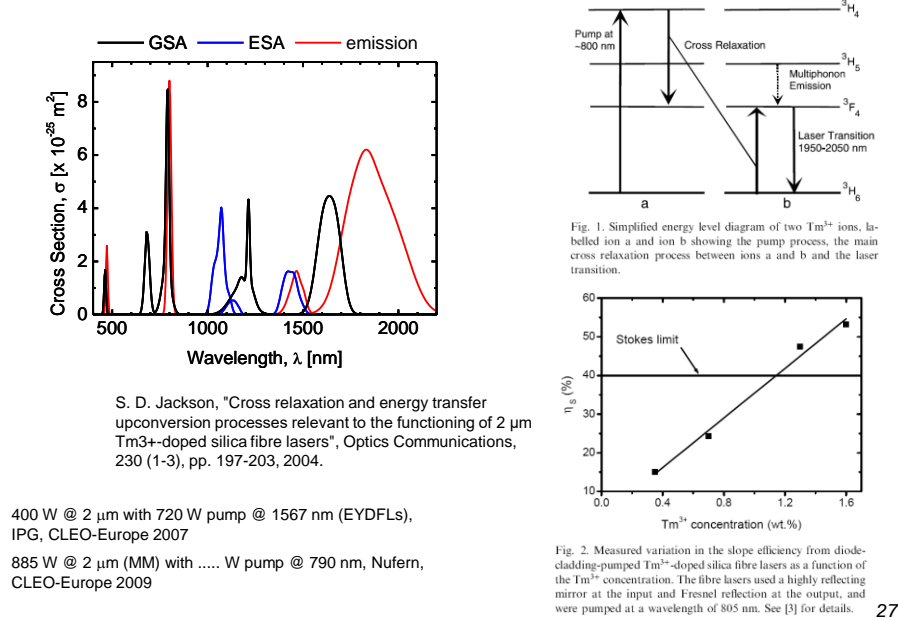
Figure 10.7: Net gain spectrum, as a function of signal wavelength, of a Pr^{3+} :ZBLAN amplifier pumped with 300 mW of power at $1.017 \mu m$. From a 1991 experiment reported in reference [7]. The background loss of 6 dB has been included in the net gain.

Alternativa pro pásmo $1.3 \mu m$: vizmutem dopovaná (Bismuth, Bi^{2+}/Bi^{5+}) křemenná a fosfátová skla, emise: $1 \dots 1.5 \mu m$

V. V. Dvoryin et al., "Bismuth-doped-glass optical fibers—a new active medium for lasers and amplifiers", Opt. Lett. 31(20):2966, 2006.

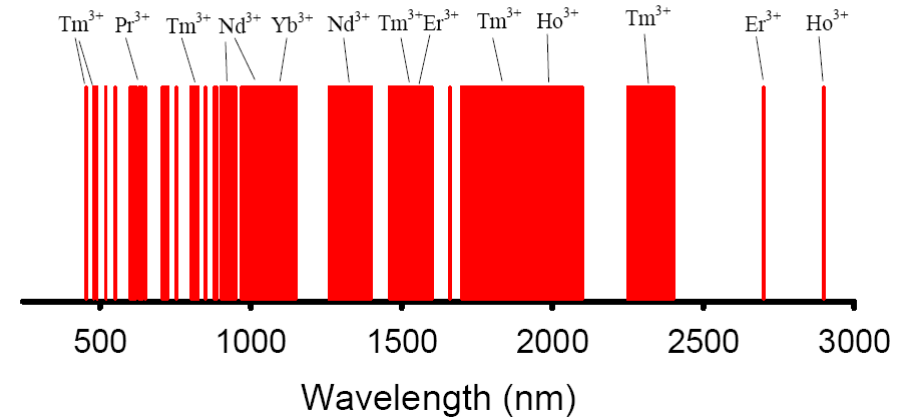
26

Thulium dopovaný vláknový laser @ 2 μm



27

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



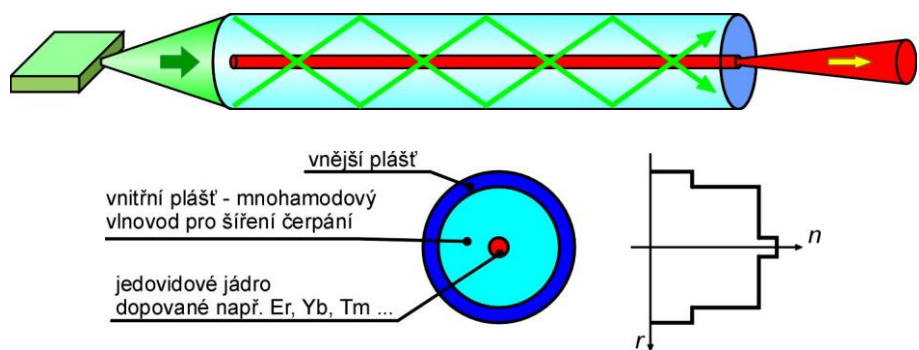
28

Vysoký výkon z vláknových laserů - metoda čerpání přes plášť

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

29

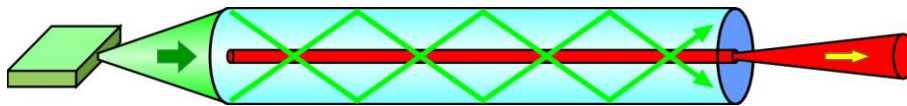
Čerpání přes plášť



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

30

Čerpání přes plášť



Výhody:

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

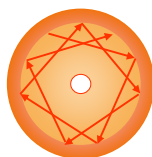
Problémy:

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

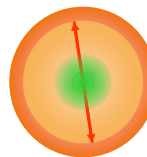
31

Hledání optimálního průřezu

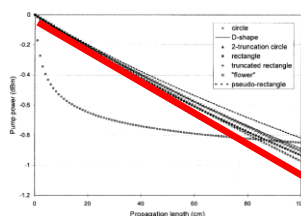
- **Kruhový průřez** – standardní tvar optických vláken



Kosé paprsky
Šroubovitá trajektorie
v projekci obecně
neuzavřený
mnohoúhelník



Meridiánové paprsky
Trajektorie v rovině osy
vlákna



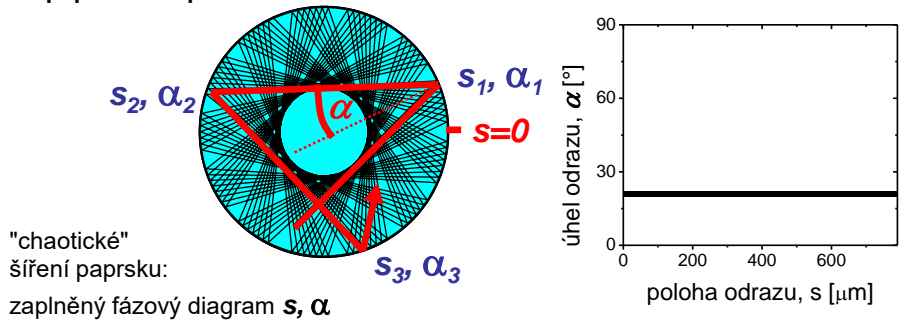
[Doya01] V. Doya, O. Legrand and F. Mortessagne, "Optimized absorption in a chaotic double-clad fiber amplifier", Opt. Lett., 26(12):872-874, 2001.
[Leproux01] P. Leproux, S. Février, V. Doya, P. Roy and D. Pagnoux, Modeling and Optimization of Double-Clad Fiber Amplifiers Using Chaotic Propagation of the Pump, Optical Fiber Technology, 7(4):324-339, 2001

32

Hledání optimálního průřezu

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

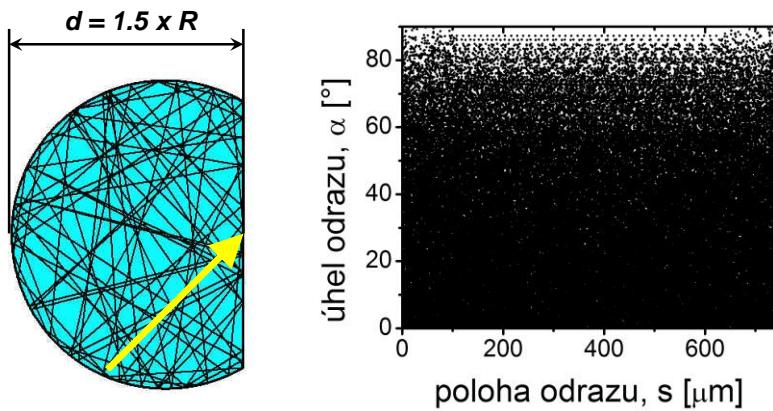
- **vlnová optika:**
statisticky rovnoměrné rozložení intenzity pole v každém bodě podél vlákna
- **paprsková optika:**



33

Zkosený kruh: "D-tvar" vlákna

A. tloušťka vlákna $d > R$

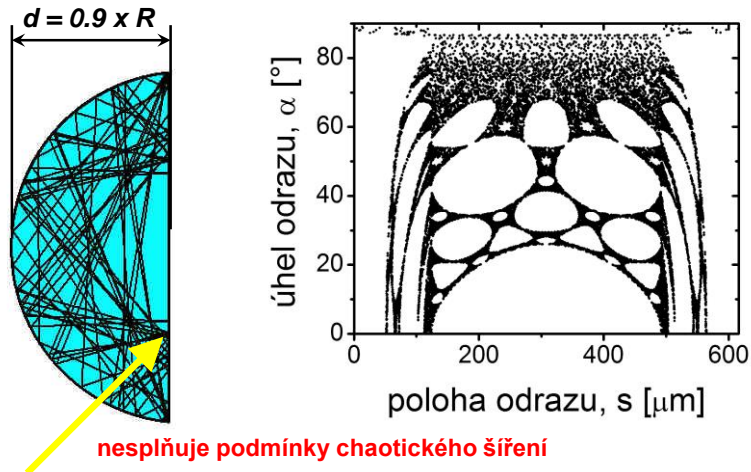


splňuje podmínky chaotického šíření

34

Zkosený kruh: "D-tvar" vlákna

B. tloušťka vlákna $d < R$



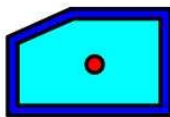
35

Ověřené optimální průřezy

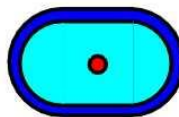
2x zkosený kruh



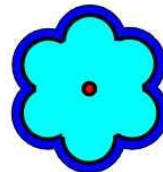
zkosený obdélník



"stadion"



"kytička"



splňují podmínky chaotického šíření

36

Další optimalizace absorpce

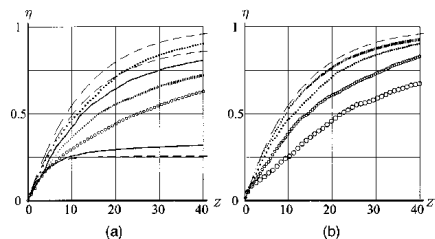
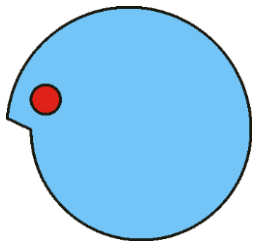


Fig. 3. (a) Efficiency η of absorption of the pump light in the core versus $Z = \kappa_0 z$. Upper dashed curve, case of ideal mixing [estimate by Eq. (9)]; dotted curve, simulation of spiral cladding with displaced core; intermediate dashed curve, the analytical estimate by formula (10); upper solid 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; $0.02 \mu^{-1}$, 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

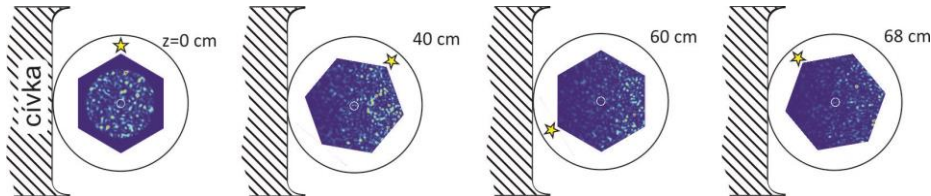
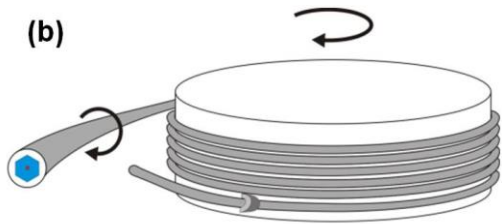
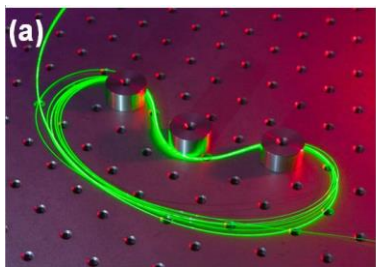


D. Kouznetsov and J. V. Moloney, "Efficiency of pump absorption in double-clad fiber amplifiers. II. Broken circular symmetry," J. Opt. Soc. Am. B 19, 1259-1263 (2002)

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.

37

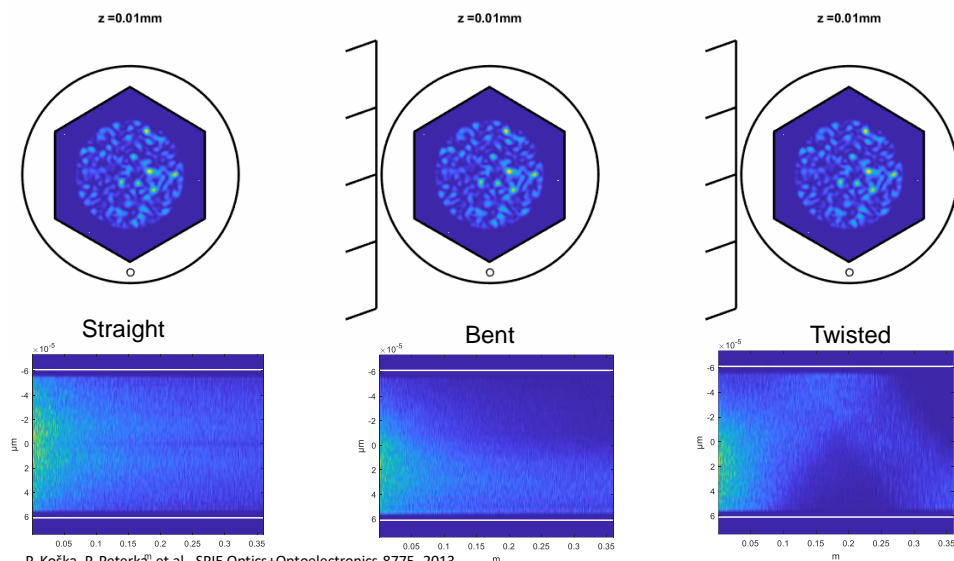
Mode-scrambling (Míchání módů)



P. Koška, P. Peterka, et al., SPIE Optics+Optoelectronics 8775, 2013.
 P. Peterka, P. Honzátko, P. Koška et al., SPIE Photonics West, p. 9344-74, 2015
 P. Koška and P. Peterka, Opt. Quant. Electron., 47:3181–3191, 2015
 P. Koška, P. Peterka and V. Doya, IEEE J. of Selected Topics in Quantum Electronics, March/April 2016, in print

38

Mode-scrambling (Míchání módů)



P. Koška, P. Peterka, et al., SPIE Optics+Optoelectronics 8775, 2013.
 P. Peterka, P. Honzátko, P. Koška et al., SPIE Photonics West, p. 9344-74, 2015
 P. Koška and P. Peterka, Opt. Quant. Electron., 47:3181–3191, 2015
 P. Koška, P. Peterka and V. Doya, IEEE J. of Selected Topics in Quantum Electronics, March/April 2016, in print

39

Pláštěm čerpané vláknové lasery – mikrostrukturní 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/>

40

Parametr kvality svazku: BPP

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

w ... poloměr svazku v krčku

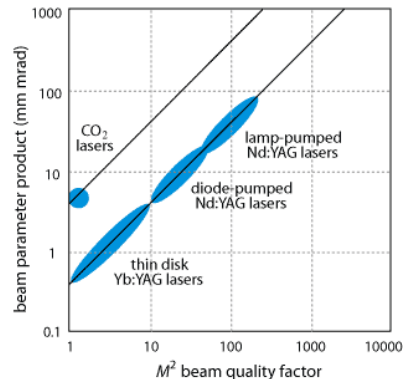
θ ... poloviční úhel divergence svazku měřený ve vzdáleném poli

čím větší BPP, tím méně kvalitní svazek

pro Gaussovský svazek platí

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

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



41

Parametr kvality svazku: M²-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, H ; anglicky brightness, B) svazku [$\text{W/m}^2/\text{Sr}$], Gaussův svazek:

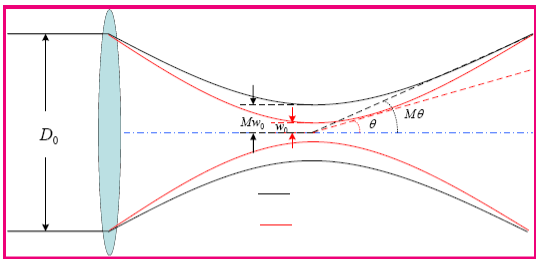
$$B = \frac{P}{\pi w_0^2 \pi \theta^2} = \frac{P}{\pi w_0^2 \pi \left(\frac{\lambda}{\pi w_0} \right)^2} = \frac{P}{\lambda^2}$$

obecný svazek : H (nebo B) = $\frac{P}{\lambda^2 M^2}$

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

42

Parametry reálného svazku pomocí M² faktoru



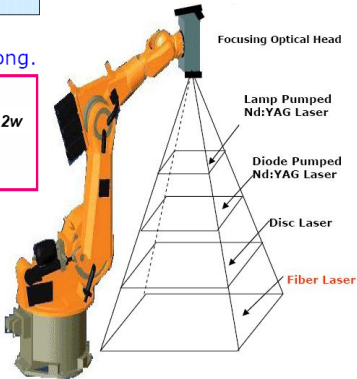
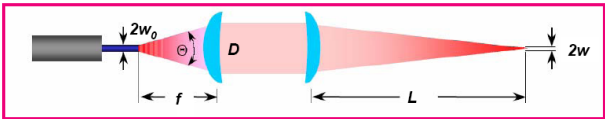
- For non single-mode beams $w_M = M \cdot w_0$
- Beam Parameter Product $BPP = w_M \cdot \theta_M = w_M \cdot NA = \frac{\lambda}{\pi} \cdot M^2$
- Focused beam diameter $2w_0 = \frac{4 \cdot f \cdot \lambda}{\pi \cdot D_0} \cdot M^2$
- Depth of focus $L = 2 \cdot z_R = \frac{8 \cdot f^2 \cdot \lambda}{\pi \cdot D_0^2 M^2}$

Ohnisková hloubka: dvojnásobek Rayleighovy vzdálenosti
(eff. plocha G. svazku je 2x větší než v ohnisku) $z_R = \frac{2\pi W_0^2}{\lambda}$ 43

Ohnisková hloubka pro různé typy laserů

Laser type	M²	BPP [mm-mrad]	Spot Diameter 2w [mm]	Beam diameter D [mm]	Focal length L [m]	Depth of focus [cm]
Disc	25.8	8.8	0.6	45	0.77	2.1
CO₂	1.76	6.0			1.12	3
SM Fiber	1.1	0.4			13.3	45

- Working distance for SM fibre lasers can be meters long.



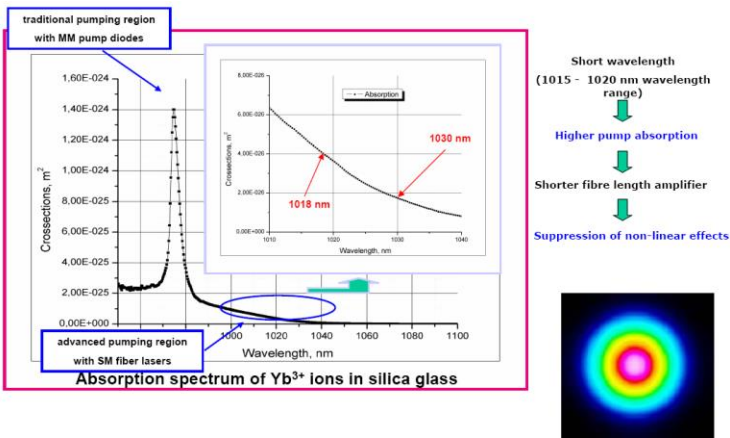
IPG: sváření vláknovým laserem na dálku



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

45

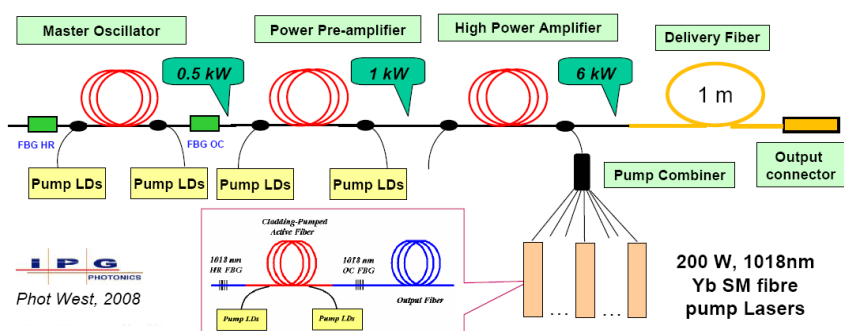
10 kW jednomódový Yb vláknový laser



46

10 kW jednomódový Yb vláknový laser

- uspořádání master oscilátor – výkonový vláknový zesilovač
- první stupně konvertují záření z čerpacích LD @980 nm s relativně velkou zářivostí do 1 kW SM záření @1070 nm
- poslední výkonový zesilovač se ziskem 7.8 dB je čerpán SM („nejjasnější“, highest brightness) Yb vláknovými lasery @1018 nm, PCE~75%
- použití large core fiber (→LMA, large mode area) eliminuje nelinearity, nebyl pozorován SRS (Stimulated Raman Scattering)



47

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

48

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)

A. Clarksson, "High power fibre lasers and amplifiers", Winter college on Fibre optics, Fibre lasers and sensors, 12-23 February 2007.

49

(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 $\theta_x \approx 8^\circ$

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

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

(c) Diode-bars

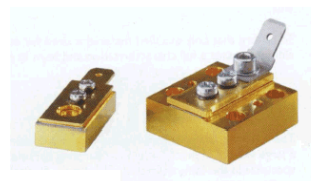
Emitting region $\sim 1\mu\text{m} \times 10\text{mm}$

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

and $\theta_x \approx 6^\circ - 9^\circ$

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

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



(d) Diode-stacks

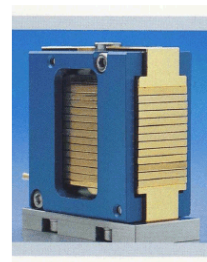
Emitter region $\sim N \times \text{bar spacing} \times 10\text{mm}$

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

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

$$\text{and } M_x^2 \sim 1300-1800$$

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

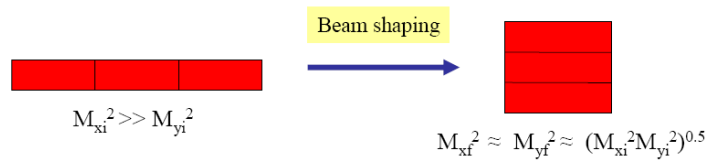


A. Clarksson, "High power fibre lasers and amplifiers", Winter college on Fibre optics, Fibre lasers and sensors, 12-23 February 2007.

50

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

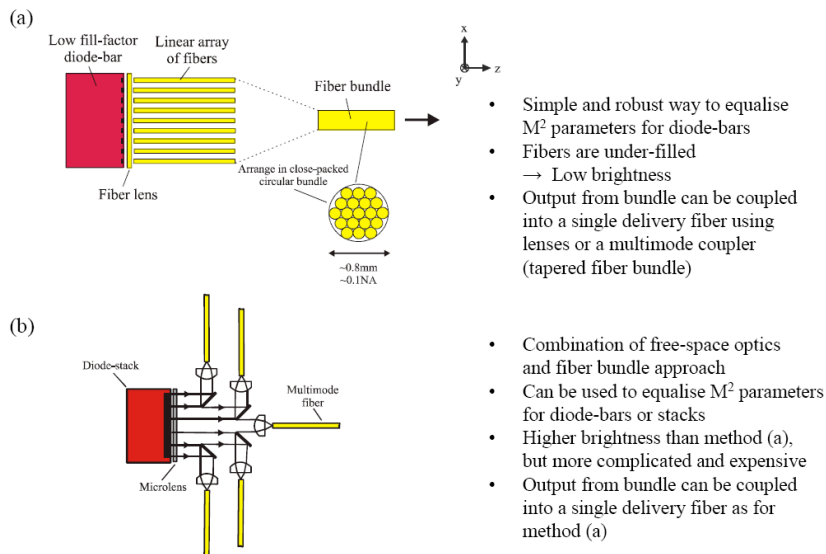


4. Scheme for launching into fiber
5. Management of stray pump light

A. Clarksson, "High power fibre lasers and amplifiers", Winter college on Fibre optics, Fibre lasers and sensors, 12-23 February 2007.

51

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

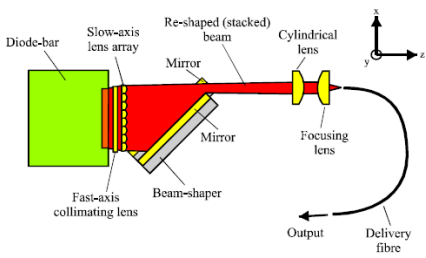
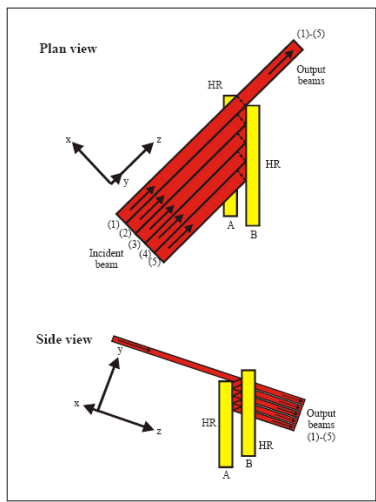


A. Clarksson, "High power fibre lasers and amplifiers", Winter college on Fibre optics, Fibre lasers and sensors, 12-23 February 2007.

52

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

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

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

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

W. A. Clarkson and D. C. Hanna, "Two-mirror beam-shaping technique for high-power diode bars", Opt. Lett., 21(6):375-377, 1996.
A. Clarksson, "High power fibre lasers and amplifiers", Winter college on Fibre optics, Fibre lasers and sensors, 12-23 February 2007.

Yterbiem dopovaný vláknový laser

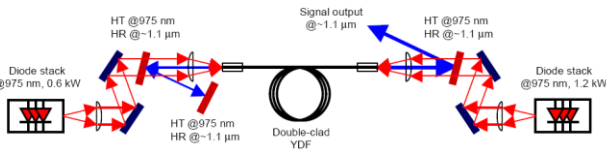


Fig. 1. YDFL experimental arrangement with two diode-stack pump sources. HR: high reflectivity, HT: high transmission.

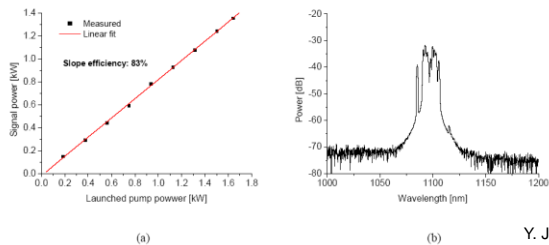
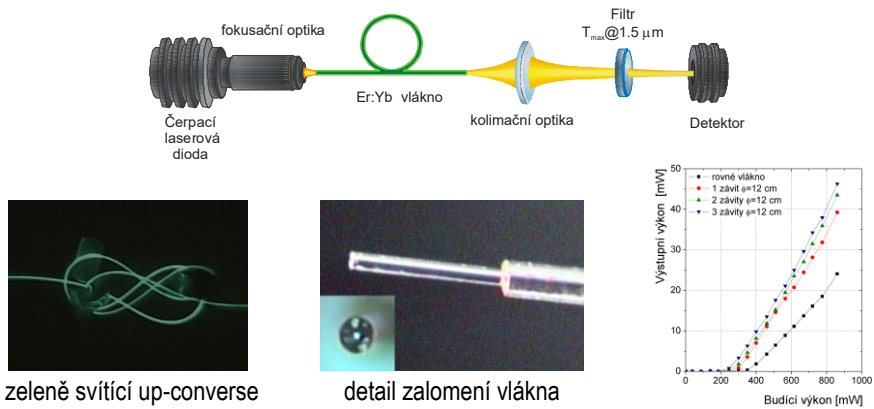


Fig. 2. (a) Fiber laser output power vs. launched pump power. (b) Laser output spectrum at full power.

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)

Způsoby navázání záření do vlákna

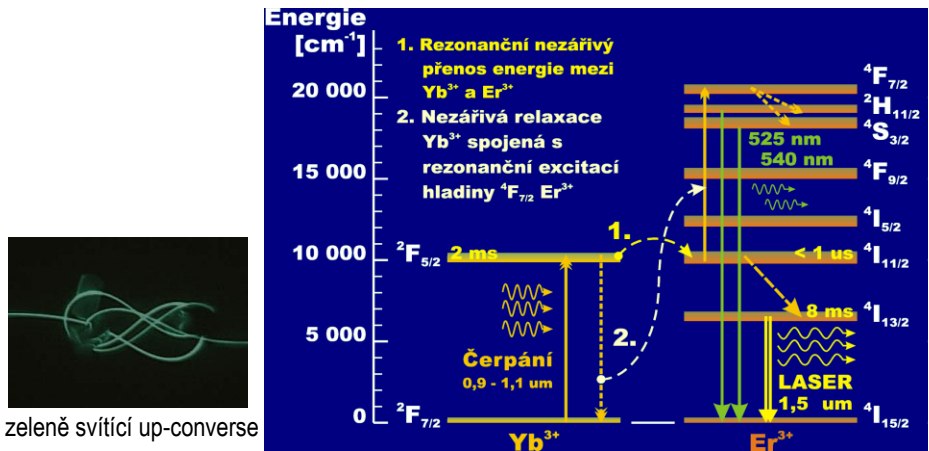
typ A) Er/Yb dopované vlákno SG852 (ÚŘE), laser sestaven na FJFI ČVUT
výkonová konverzní účinnost 32% při čerpání 750 mW @ 969 nm



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

55

Schéma energetických hladin iontů Er a Yb



56

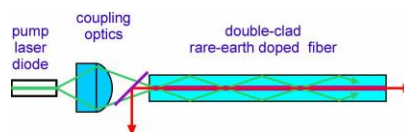
Metody napojení záření signálu a čerpání do jednoho dvouplášťového vlákna

57

Způsoby navázání záření do vlákna

a) přímé navázání objemovými prvky

často využívané v laboratořích, nutnost nastavování

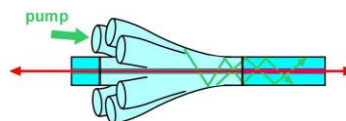


b) svazek vláken obsahující signálové vlákno a čerpací vlákno(a), např. svařovaný vazební člen

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: Grudinin A. B. et al., CLEO'99 (1999) CPD26.



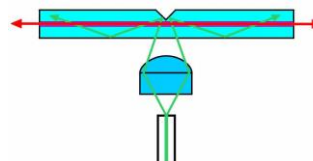
c) stranové čerpání

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: Koplow J. P., JQE 39, (2003) 529.

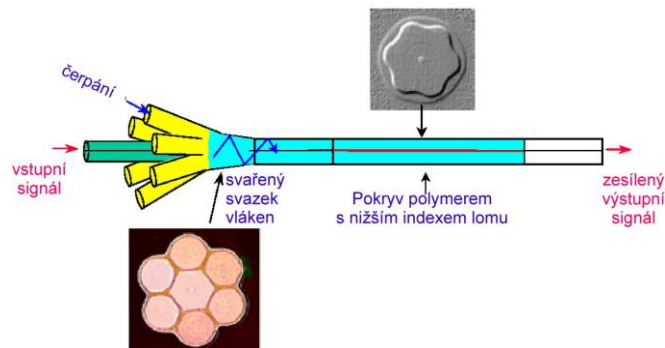
Angle-polished fibers: Larsen J. J., Opt. Lett. 29 (2004) 436.



58

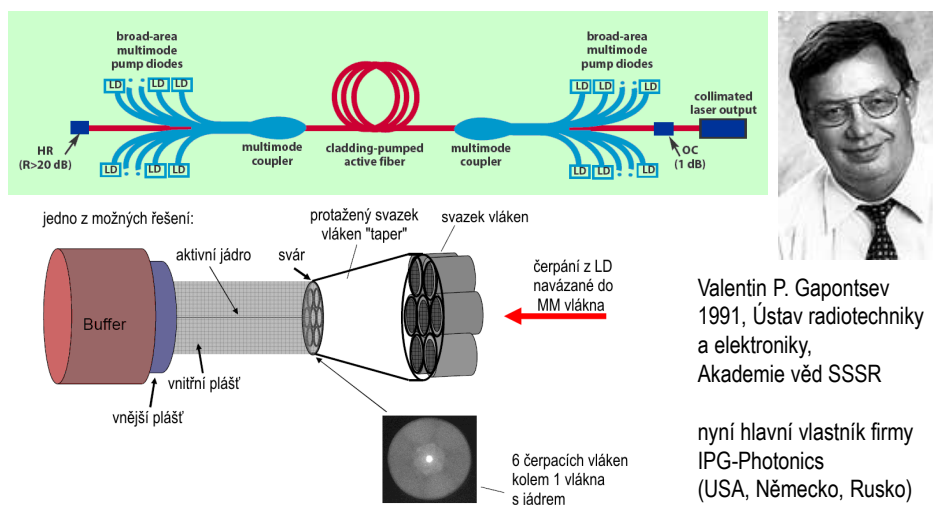
Způsoby navázání záření do vlákna

typ B) **Lucent Technologies: "Star coupler"**
D. J. DiGiovanni, U.S. patent #5,864,644.



59

Způsoby navázání záření do vlákna - IPG



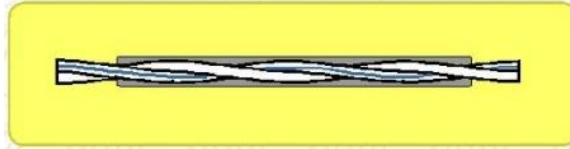
Valentin P. Gapontsev
1991, Ústav radiotechniky
a elektroniky,
Akademie věd SSSR

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

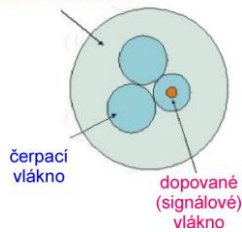
60

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

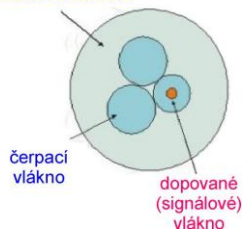
61

Způsoby navázání záření do vlákna

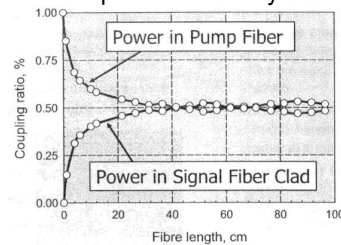
typ B) Southampton Photonics: "GT Wave" vlákno (vláknový svazek)



společný vnější plášť
s nižším indexem lomu



Vazba čerpání mezi vlákny svazku

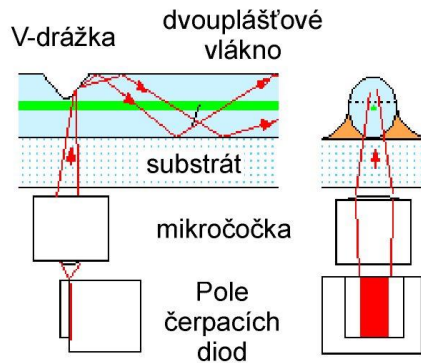


2-vláknový GTWave svazek, Interakční délka <50 cm

62

Způsoby navázání záření do vlákna

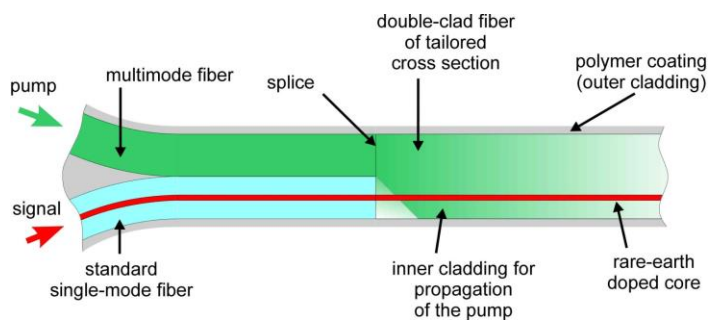
- **typ C) boční čerpání V-drážkou**
- V-groove side pumping (VSP)
-



- [Goldberg97] L. Goldberg, B. Cole and E. Snitzer, "V-groove side-pumped 1.5 μm 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)

63

Způsoby navázání záření do vlákna

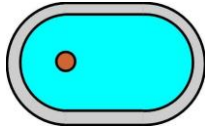


- **Požadavky na tvar průřezu DC vlákna:**
- 1. je co nejvíce podobný průřezu dvou vstupních vláken pro usnadnění sváru
- 2. zajišťuje optimální absorpci čerpání podél vlákna (chaotické trajektorie paprsků)

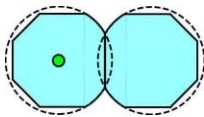
64

Příprava dvouplášťového vlákna

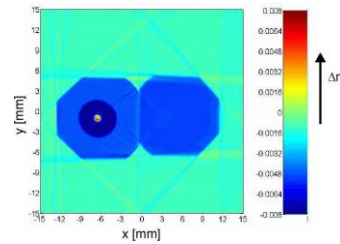
vybraný tvar průřezu "stadion"



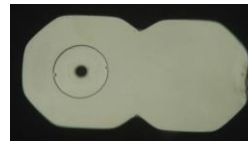
Realizace v praxi: spojení dvou preforem zbroušených po stranách



Tomografické zobrazení průřezu a profilu indexu lomu typické preformy



mikroskopická fotografie čela DC vlákna



65

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

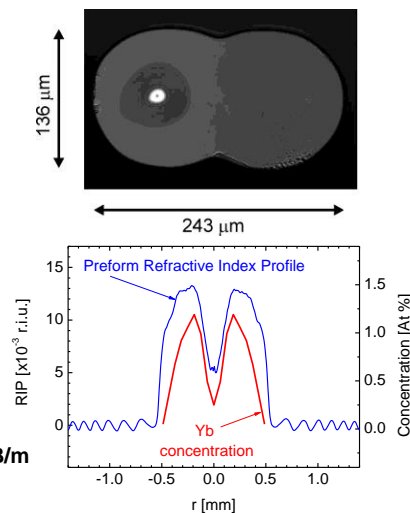
Koncentrace: Er~600 ppm, Yb~12000 ppm

(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



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

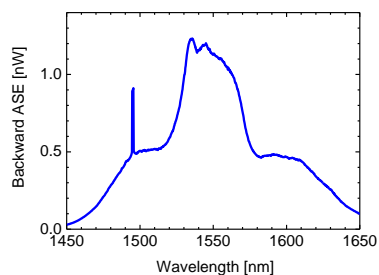
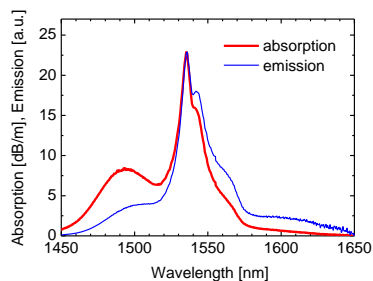
\rightarrow šíření čtyř modů na $\lambda = 1550$ nm

Koncentrace: Er~600 ppm, Yb~12000 ppm
(poměr Er:Yb ~ 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



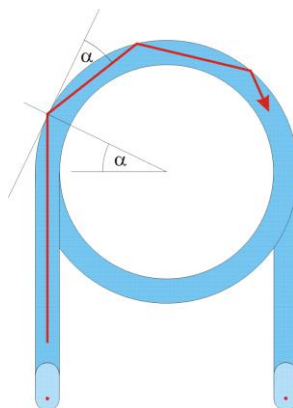
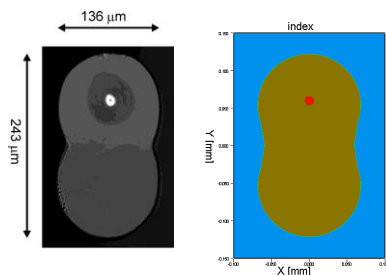
1. Distance needed for homogeneous transversal distribution of the pump

simulation software: OlympIOs ver 5.1.12

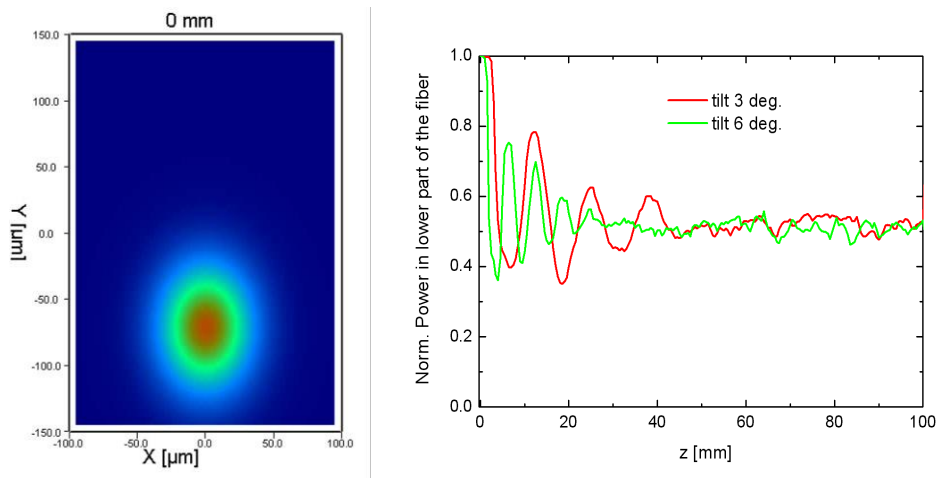
(C2V & Uni. of Twente, Netherland)

3D BPM, Gaussian input beam ($25 \times 35 \mu\text{m}$),

$\lambda_p = 975$ nm, tilt $\alpha = 3-6^\circ$ (spool diam. 3-10 cm)



1. Distance needed for homogeneous transversal distribution of the pump

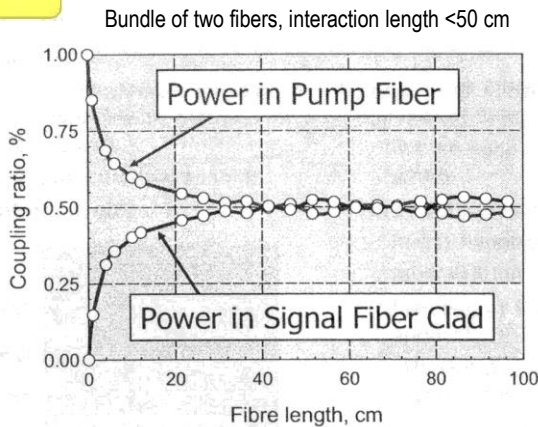
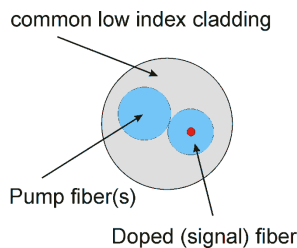
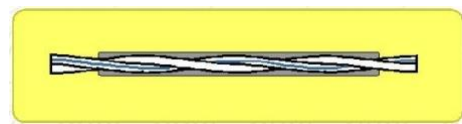


COST 299, Berlin, 5-7 February 2008

69

Comparison with fiber bundle - GTWave

J. Nilsson, "High power fiber lasers and amplifiers", OFC'07, SC290, March 25, 2007.



COST 299, Berlin, 5-7 February 2008

70

2. Pump absorption

OlympIOs software is devoted to modelling of integrated optics devices (device length limit ~20 cm) \Rightarrow 3D BPM software developed in LPMC Nice was used to model absorption along the fiber.

Yb: 12000 ppm

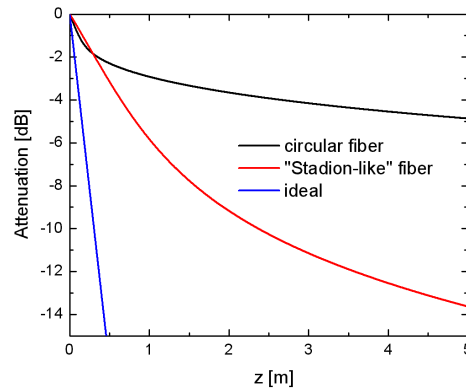
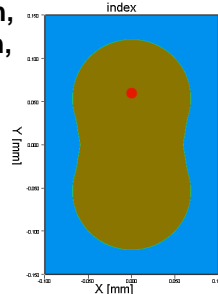
$\sigma_{\text{abs}}^{\text{peak}} = 28 \times 10^{-25} \text{ m}^2$

the same cross-section and Gauss. input beam:

$25 \times 35 \text{ } \mu\text{m}$,

$\lambda_p = 975 \text{ nm}$,

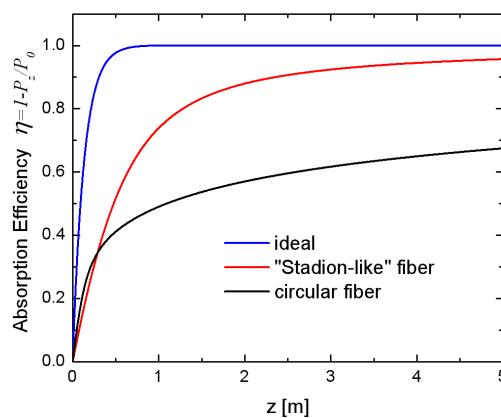
tilt 6°



COST 299, Berlin, 5-7 February 2008

71

2. Pump absorption

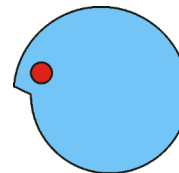


90% pump is absorbed
in ~3 m of DC fiber

Pump absorption does not saturates \Rightarrow cross section is optimal.

Some DC fiber design may offer absorption efficiency closer to the ideal case.

Spiral cladding



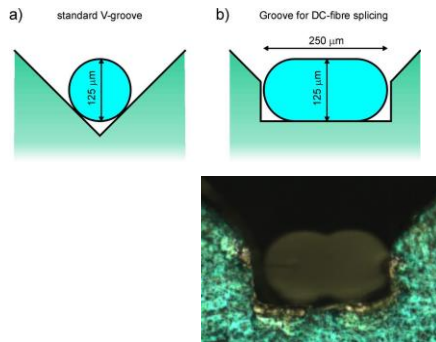
D. Kouznetsov and J. V. Moloney, "Efficiency of pump absorption in double-clad fiber amplifiers. II. Broken circular symmetry," J. Opt. Soc. Am. B 19, 1259-1263, 2002.

COST 299, Berlin, 5-7 February 2008

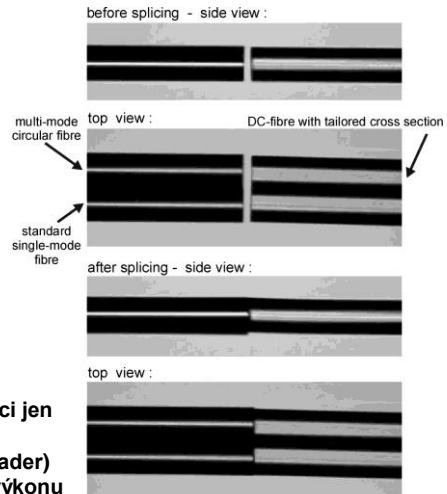
72

Sváření

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

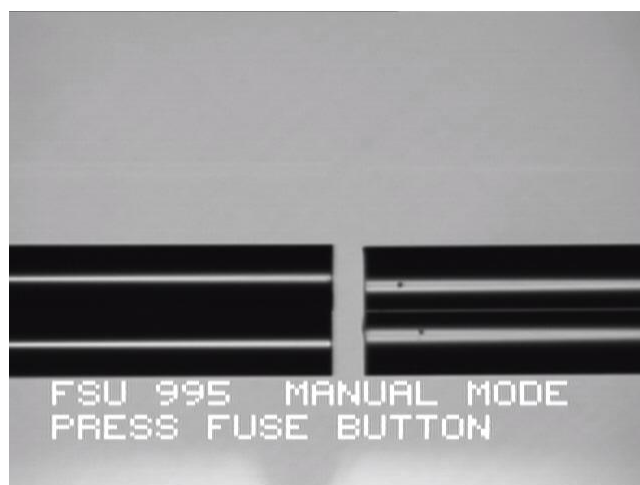


tvary dvou kruhových vláken a DC vlákna se přeci jen liší \Rightarrow mírně snížené časy svařovacího oblouku
Ztráty se SMF: 1.2 dB (díky rozdílnému profilu jader)
a <0.1 dB s MMF. ~0.2 dB vzrůst v přeneseném výkonu
(odstranění Fresnelových odrazů svárem)



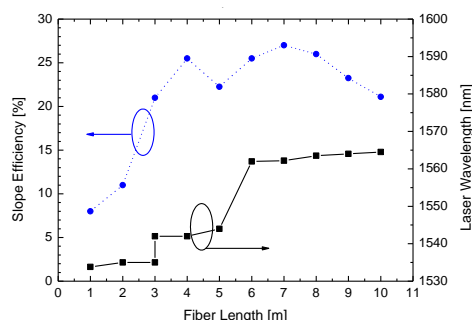
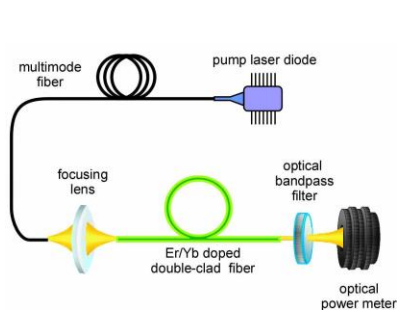
73

Sváření



74

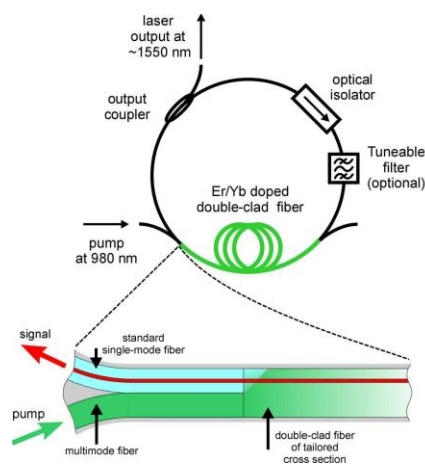
Fabryův-Perotův rezonátor



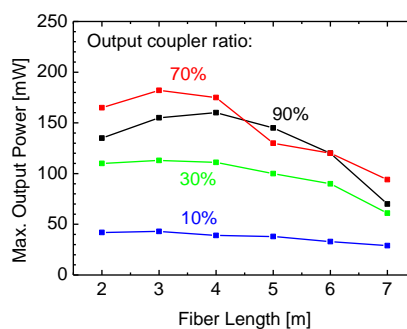
rezonátor laseru je tvořen kolmo zalomenými konci vlákna (odrazivost 3.5 %).
 Čerpání: MM laserová dioda s navázáním do vlákna, 1.3 W ve 100 μm jádře MMF,
 1.07 W v dvouplášťovém vlákně.

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

Kruhový rezonátor



Optimalizace délky dvouplášťového vlákna



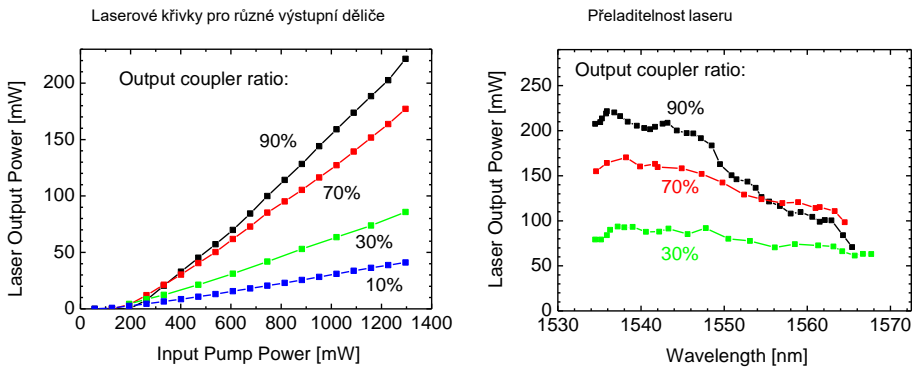
Optimální délka vlákna: 3.5 m.

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).

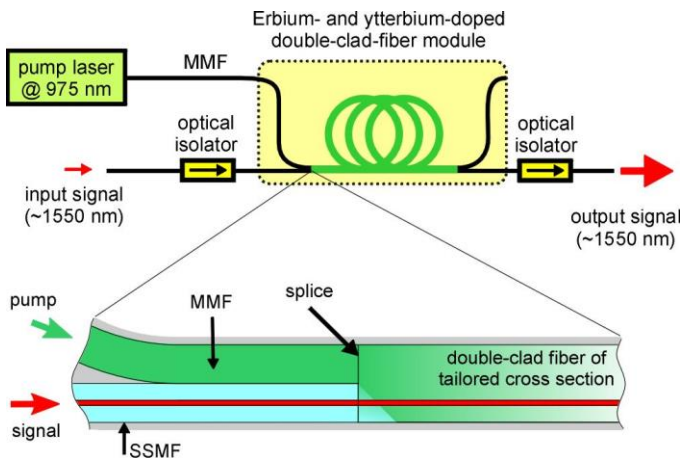
"End-Pumping Fiber Amplifiers Made Easy", Photonics Spectra (January 2007).

Kruhový vláknový laser s optimální délkou vlákna L=3.5 m



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

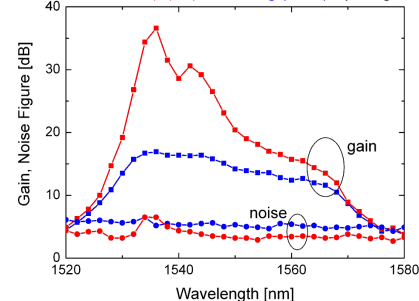
Vláknový zesilovač



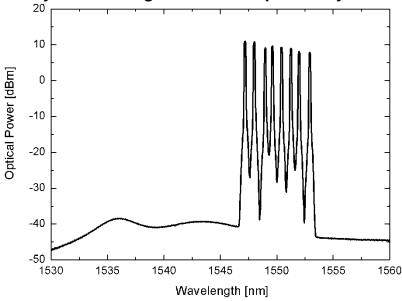
P. Peterka, I. Kašík, V. Matějec, M. Karásek, J. Kaňka, P. Honzátko, V. Kubeček, "Amplifier Performance ...", Optical Fiber Communication Conference OFC'07, paper JWA12, Anaheim, California, USA, March 25-29, 2007.

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.

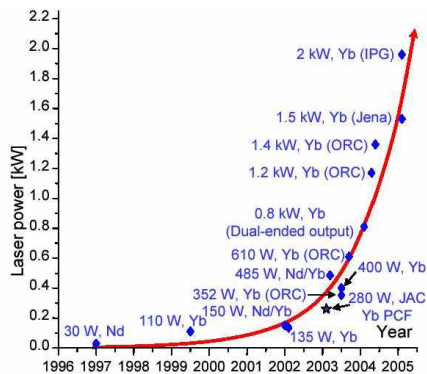
79

Limity výstupního výkonu kontinuálních vláknových laserů

Power scaling limits of continuous wave YDFL

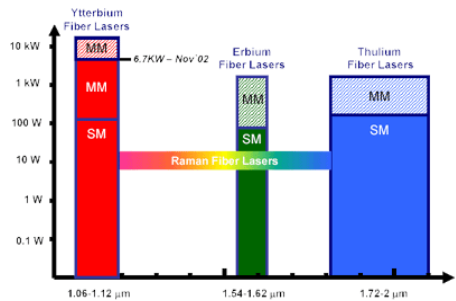
80

Pláštěm čerpané vláknové lasery



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

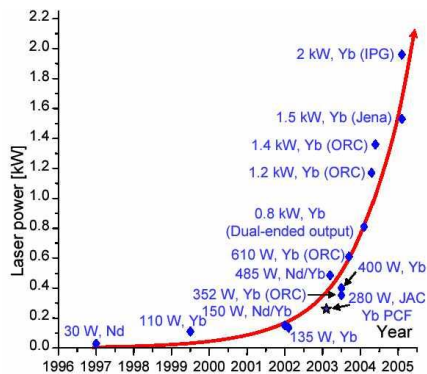
J. Nilsson, OAA'05, Budapest, August 7-10, 2005



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

81

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

Kam až poroste výstupní výkon?

Jaké jsou limity Yb vláknových laserů?

82

Výkonová omezení Yb vláknových laserů

Optické poškození průrazem dielektrika.

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

$$E_p = 30 \times 10^6 \text{ V/m}, \quad I_{\max} = 1.7 \text{ W}/\mu\text{m}^2, \quad \text{v opt. vlákně } I_{\max} = 3\text{--}20 \text{ W}/\mu\text{m}^2$$

$$I \approx P_{\text{out}}/A_{\text{eff}} \rightarrow \text{čím větší jádro, tím lépe. (odhad Kao66: 50 MW/cm}^2, \text{ tj. } 0.5 \text{ W}/\mu\text{m}^2)$$

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),

Raman scattering: 13 THz (44nm @1000 nm, 92nm @1460 nm) Brillouin s.: 10 GHz (backward)

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

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

L_{eff} vyjadřuje úsek vlákna, kde je významná nelineární interakce (eff. Interaction length, Agrawal p.17). Ve vláknech, kde je svazek vedený a nediverguje, je určena útlumem vlákna. $L_{\text{eff}} = [1 - \exp(-\alpha_p L)] / \alpha_p$

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

83

Ramanovské lasery

Ramanův rozptyl – nepružný (neelastický) rozptyl světla v látce, tj. energie dopadajícího fotonu je přeměněna do fotonu s nižší energií a do fononu (vibračních stavů molekul materiálu).

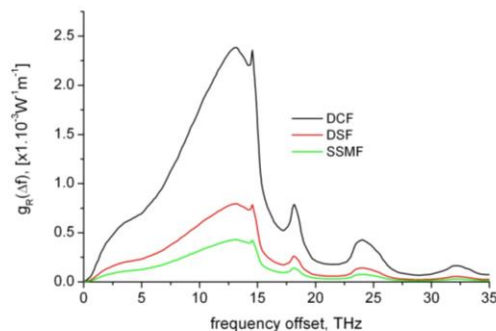
Frekvenční posuv v křemenném vlákně: **~13 THz**

silný signál (čerpání) může předávat energii signálu na delší vlnové délce
čerpání 1 μm max. zesílení pro záření @ 1044 nm

→ **stimulovaný Ramanův rozptyl**

Rayleighův rozptyl - příklad elastického, pružného rozptylu ($\sim 1/\lambda^4$), kdy frekvence rozptýleného světla je stejná jako dopadajícího.

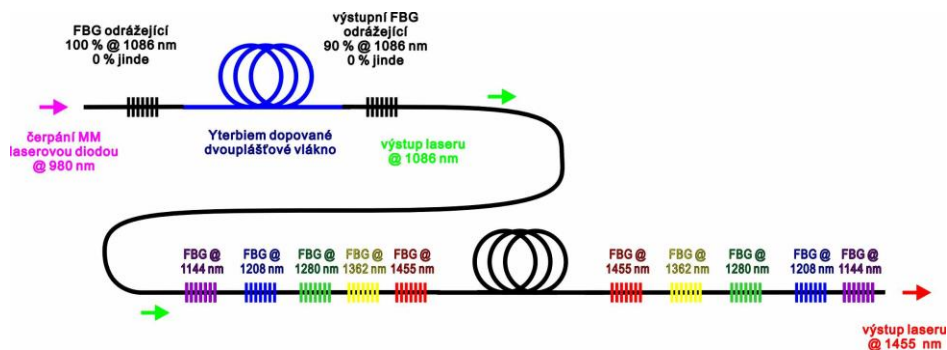
Brillouinův rozptyl - neelastický rozptyl, odraz dopadající vlny od akustické vlny, kterou dopadající vlna sama generuje. Rozdíl frekvencí rozptýleného fotonu je cca 10 GHz (Dopplerův posuv daný rychlostí šíření akustické vlny v prostředí)



84

Ramanovské lasery

Stimulovaný Ramanův rozptyl v jednomódových optických vláknech lze využít k účinné konverzi záření laseru do optické vlny s nižší frekvencí, do tzv. Stokesovy vlny. Zapouzdřené rezonátory → posun dále k delším vlnovým délkám.



85

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.

86

Výkonová omezení Yb vláknových laserů

Navázaný čerpací výkon

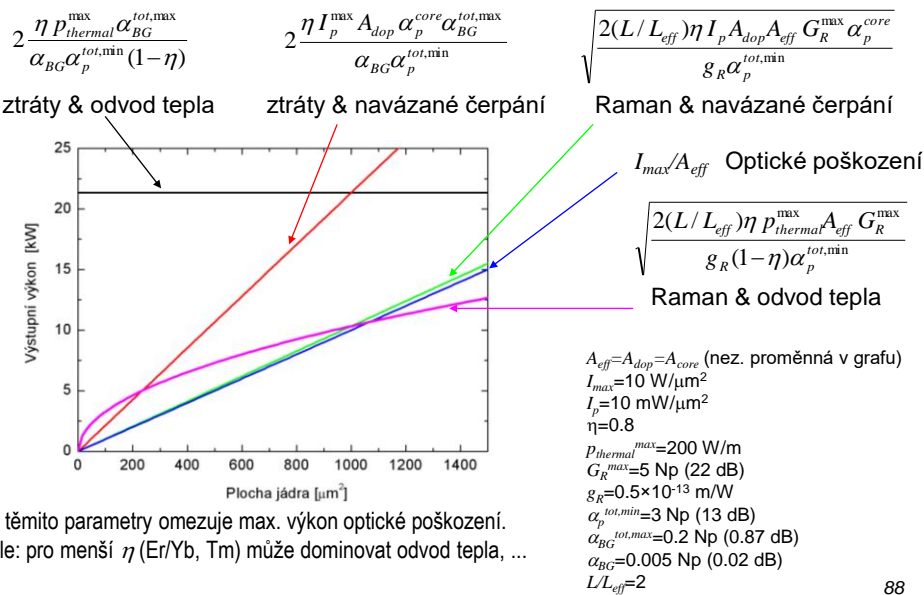
Typická intenzita čerpacích diod 3 mW/μm²
Pokročilá technologie diod & vnitřní plášť s velkou NA → až 10 mW/μm²
celoskleněné vlákno: NA 0.2-0.3 → vyžaduje diody s velkou zářivostí
vlákno s polymerním vnějším pláštěm: NA 0.4-0.5 (ale problémy s tepelným poškozením)
mikrostrukturální vlákno (air-clad): 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 $\alpha_p \approx \alpha_p^{core} A_{core}/A_{clad}$.
Vlákna silnější než 1 mm lze těžko ohýbat (a vyrábět)

délka vlákna parametr, který lze nejsnáze 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.

87

Výkonová omezení Yb vláknových laserů



88

Zvyšování výkonu a zářivosti (jasu) spojováním svazků

Power and brightness scaling via beam combination

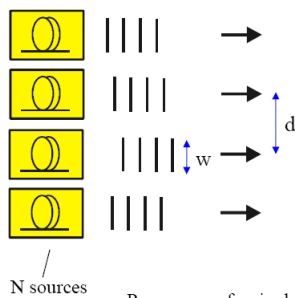
89

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



Far-field beam divergence of array = θ_A
 Far-field beam divergence of single element = θ_s
 No phase relationship between elements $\rightarrow \theta_A = \theta_s$

$$M_s^2 \approx \frac{\pi w \theta_s}{2\lambda} \quad \text{and} \quad M_A^2 \approx \frac{\pi N d \theta_s}{2\lambda}$$

$\rightarrow P_A = N P_s$

$\rightarrow \frac{B_A}{B_s} \approx \frac{w}{d} = \eta_{\text{fill}}$

P_s = power of a single element, P_A = power of array, B_s = brightness of a single element, B_A = brightness of array and η_{fill} is the fill-factor

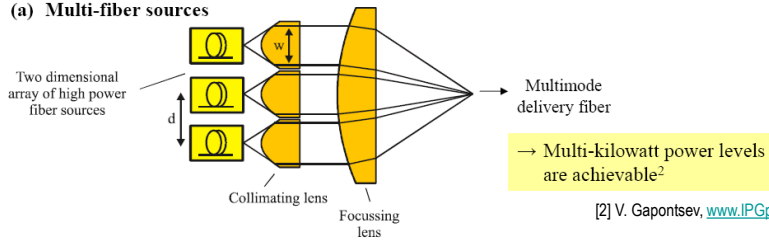
A. Clarksson, "High power fibre lasers and amplifiers", Winter college on Fibre optics, Fibre lasers and sensors, 12-23 February 2007.

90

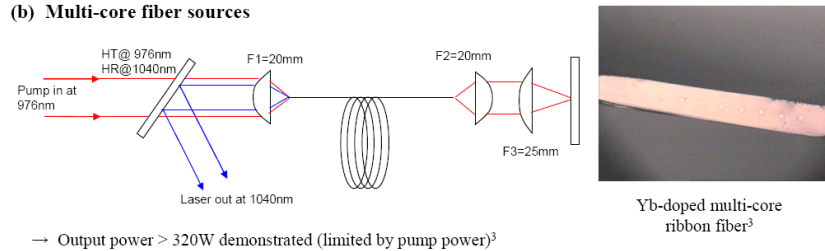
→ Simple and robust way to scale output power, but brightness cannot exceed the brightness of a single element

Examples:

(a) Multi-fiber sources



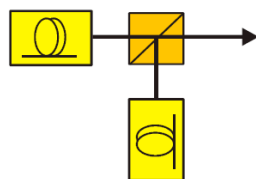
(b) Multi-core fiber sources



A. Clarksson, "High power fibre lasers and amplifiers", Winter college on Fibre optics, Fibre lasers and sensors, 12-23 February 2007.

91

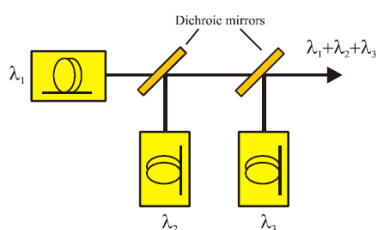
Polarization beam combining



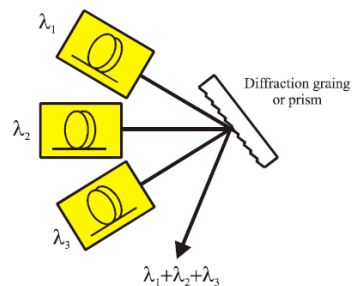
$$B_A = 2\eta_c B_S$$

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

Wavelength beam combining



or

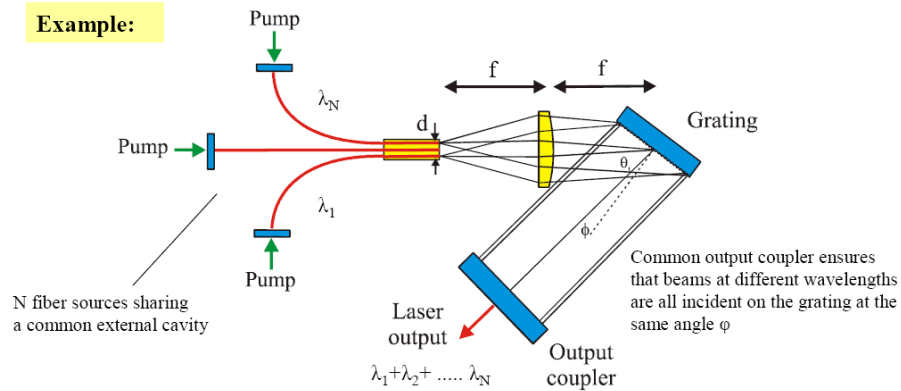


$$B_A = N\eta_c B_S$$

A. Clarksson, "High power fibre lasers and amplifiers", Winter college on Fibre optics, Fibre lasers and sensors, 12-23 February 2007.

92

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

S. J. Augst, et al., "Wavelength beam combining of ytterbium fiber lasers," Opt. Lett. 28, 331-333 (2003),

A. Clarksson, "High power fibre lasers and amplifiers", Winter college on Fibre optics, Fibre lasers and sensors, 12-23 February 2007.

93

→ **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 $>100\text{W}$ 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

A. Clarksson, "High power fibre lasers and amplifiers", Winter college on Fibre optics, Fibre lasers and sensors, 12-23 February 2007.

94

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

95

Slunce:

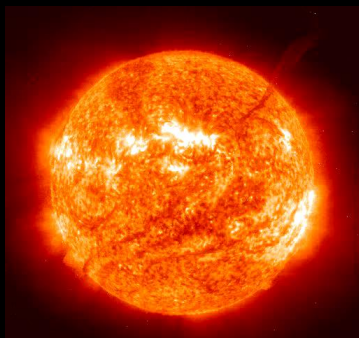
teplota slunečního povrchu: 5780 K

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 materiálu

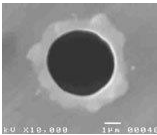
dekorativní rytí



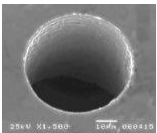
značkování a popisování výrobků



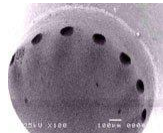
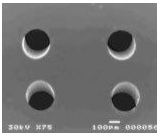
Děrování, od 1 mm
5 mm otvor v
ocelovém plechu



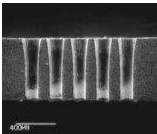
Trepanování
(vyřezávání)
děr, od 20um
50 um otvor v
ocelovém plechu



Vrtání a tvarování vstřikovacích trysek pro
benzínové a dieselové motory



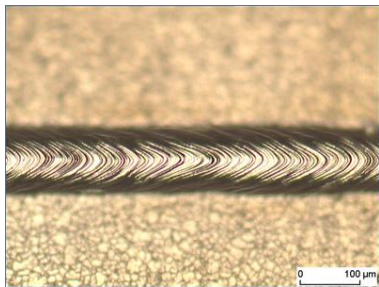
Rozšiřující se
otvory –
125 um díry
v hliníku



97

Svařování

svár shora



řez svárem



98

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



99

Zpracování materiálu

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



100

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.

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

výhody: možnost použití optických vláken pro transport svazku.

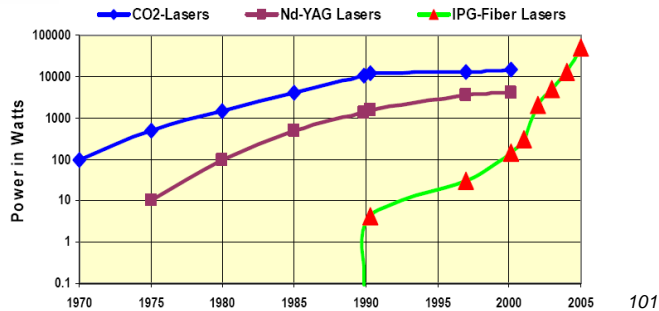
nevýhody: nižší absorpce v materiálech, pro povrchové svařování je lepší.

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.



LIDAR

LIDAR (**L**ight **D**etection **A**nd **R**anging)

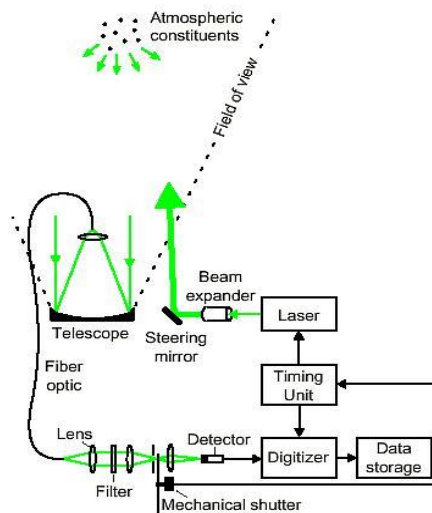
– optický RADAR

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:

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



LIDAR

Typy LIDARů:

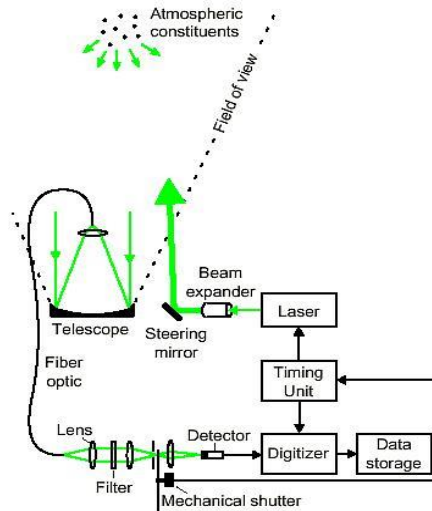
Dálkoměry netradiční aplikace –

- 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

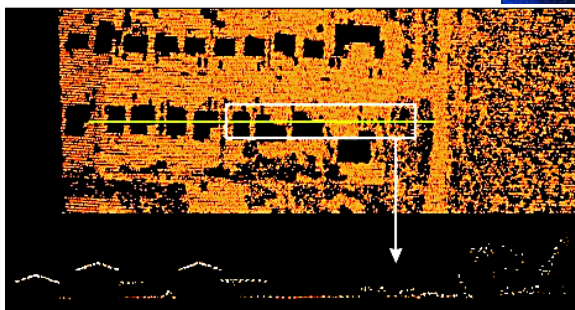
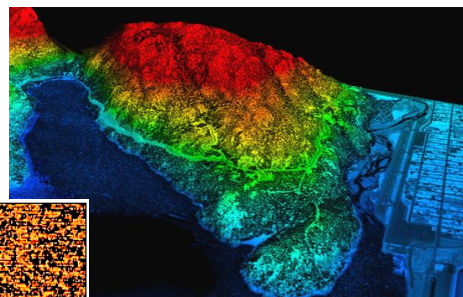
Dopplerovský lidar měření rychlosti objektu. Světlo rozptýlené od přibližujícího se objektu vykazuje modrý posuv, od vzdalujícího se červený posuv frekvence. Měření rychlosti rychlosti větru, turbulencí před letadly (vláknové lasery!).



103

LIDAR

topografie zemského povrchu



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

104

Obranné systémy



Obranný systém amerického námořnictva pro ničení taktických zbraní obsahuje šest samostatných vláknových laserů nekoherentně sloučených do jediného svazku s celkovým výkonem 33 kW. Ukázka zničení bezpilotního letounu tímto laserem.
Zdroj: US Navy

105

Obranné systémy



Obranný systém amerického námořnictva pro ničení taktických zbraní obsahuje šest samostatných vláknových laserů nekoherentně sloučených do jediného svazku s celkovým výkonem 33 kW. Ukázka zničení bezpilotního letounu tímto laserem.
Zdroj: US Navy

106

Obranné systémy

Pro víceúčelové kolové vozidlo americké armády, známé Humvee byl například vyvinut 2 kW vláknový laser pro účinné zneškodňování min a improvizovaných výbušnin.



Dny otevřených dveří v ÚFE v rámci TVT:

20. ročník: 6.11.2020 – virtuálně

<https://www.ufe.cz/cs/poznejte-dalsi-nase-laboratore-virtualne>



Chaberská 57, Praha 8 - Kobylisy
cca 10 min od metra Kobylisy
nebo tram č. 17, zastávka "Líbeznická"



Rozvojová 135, areál Akademie věd
Praha 6, z Dejvické bus č. 107 a 147
zast. "Kamýcká" v Suchdole



21. STOLETÍ – PANORAMA č. 6/2012

č. 2 /2012:

Jiří Homola:

Str. 84-87: Biosenzory odhalí ...

Ivan Kašík, Ladislav Šašek (Safibra)

optické vláknové senzory

str. 44-46 Jak si posvítit na tunel

■ VÝHODY VLÁKNOVÝCH LASERŮ

VYSOKÁ ÚČINNOST

Notoricky známým nedostatkem většiny laserů vždy byla jejich zofale malá účinnost – v řádu jednotek procent. Laserové diody mají účinnost celkem dostačující, dokáží převést typicky 50 % (max. 70 %) elektrické energie do laserového světla. Světlo čerpací laserové diody je ve vláknových laserech konvertováno s účinností 60–70 % (přes 90 % laboratorně), takže celková účinnost komerčních vláknových laserů dosahuje až



■ Skleněná „preforma“ dvouplášťového optického vlákna

jasného laserového svazku (viz obr. 3).

JSOU ROBUSTNÍ A KOMPAKTNÍ

Jednotlivé části vláknového laseru jsou k sobě pevně spojeny svárem, nevyžadují proto časově náročné pravidelné nastavování a servis, jsou nenáročné na obsluhu a mají dlouhou životnost, prověřenou podobnými přístroji v telekomunikacích.

NEVYŽADUJÍ SLOŽITÉ CHLAZENÍ

Vláknové geometrie umožňují velmi efektivní

OPTICKÉ SYSTÉMY

VLÁKNOVÉ LASERY DOBÝVAJÍ SVĚT!

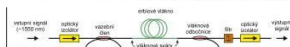
Když se dva spojí v jeden, vždy to přináší více možností. To platí i na poli moderních technologií. Co se stane,

zařízení, jež v současnosti nachází stále širší a širší uplatnění. Vláknové lasery začínají nahrazovat starší typy laserů



■ Obr. 2 – Optické vlákno jako světelná trubice

den dlouhoce přelvy v náročných podmínkách. Může to být ochlazení, jako v analýzách ZETA, případně vysoká rychlost nebo tlak. Systém optické vlny vyvolává například vlnění vlnění vlnění. Zde se nachází je pro svou rychlost a přesnost signálu podstatně lepší než ostatní. Zde se nachází je pro svou rychlost a přesnost signálu podstatně lepší než ostatní. Zde se nachází je pro svou rychlost a přesnost signálu podstatně lepší než ostatní.



PIONÝR I REKORDMAN

Rekordy ve výkonových vláknových laserech drží IPC Photonics, dnes je firma v globálním plánu. Vyroba laserů vlnové délky 1064 nm, 1080 nm, 1090 nm, 1100 nm, 1110 nm, 1120 nm, 1130 nm, 1140 nm, 1150 nm, 1160 nm, 1170 nm, 1180 nm, 1190 nm, 1200 nm, 1210 nm, 1220 nm, 1230 nm, 1240 nm, 1250 nm, 1260 nm, 1270 nm, 1280 nm, 1290 nm, 1300 nm, 1310 nm, 1320 nm, 1330 nm, 1340 nm, 1350 nm, 1360 nm, 1370 nm, 1380 nm, 1390 nm, 1400 nm, 1410 nm, 1420 nm, 1430 nm, 1440 nm, 1450 nm, 1460 nm, 1470 nm, 1480 nm, 1490 nm, 1500 nm, 1510 nm, 1520 nm, 1530 nm, 1540 nm, 1550 nm, 1560 nm, 1570 nm, 1580 nm, 1590 nm, 1600 nm, 1610 nm, 1620 nm, 1630 nm, 1640 nm, 1650 nm, 1660 nm, 1670 nm, 1680 nm, 1690 nm, 1700 nm, 1710 nm, 1720 nm, 1730 nm, 1740 nm, 1750 nm, 1760 nm, 1770 nm, 1780 nm, 1790 nm, 1800 nm, 1810 nm, 1820 nm, 1830 nm, 1840 nm, 1850 nm, 1860 nm, 1870 nm, 1880 nm, 1890 nm, 1900 nm, 1910 nm, 1920 nm, 1930 nm, 1940 nm, 1950 nm, 1960 nm, 1970 nm, 1980 nm, 1990 nm, 2000 nm, 2010 nm, 2020 nm, 2030 nm, 2040 nm, 2050 nm, 2060 nm, 2070 nm, 2080 nm, 2090 nm, 2100 nm, 2110 nm, 2120 nm, 2130 nm, 2140 nm, 2150 nm, 2160 nm, 2170 nm, 2180 nm, 2190 nm, 2200 nm, 2210 nm, 2220 nm, 2230 nm, 2240 nm, 2250 nm, 2260 nm, 2270 nm, 2280 nm, 2290 nm, 2300 nm, 2310 nm, 2320 nm, 2330 nm, 2340 nm, 2350 nm, 2360 nm, 2370 nm, 2380 nm, 2390 nm, 2400 nm, 2410 nm, 2420 nm, 2430 nm, 2440 nm, 2450 nm, 2460 nm, 2470 nm, 2480 nm, 2490 nm, 2500 nm, 2510 nm, 2520 nm, 2530 nm, 2540 nm, 2550 nm, 2560 nm, 2570 nm, 2580 nm, 2590 nm, 2600 nm, 2610 nm, 2620 nm, 2630 nm, 2640 nm, 2650 nm, 2660 nm, 2670 nm, 2680 nm, 2690 nm, 2700 nm, 2710 nm, 2720 nm, 2730 nm, 2740 nm, 2750 nm, 2760 nm, 2770 nm, 2780 nm, 2790 nm, 2800 nm, 2810 nm, 2820 nm, 2830 nm, 2840 nm, 2850 nm, 2860 nm, 2870 nm, 2880 nm, 2890 nm, 2900 nm, 2910 nm, 2920 nm, 2930 nm, 2940 nm, 2950 nm, 2960 nm, 2970 nm, 2980 nm, 2990 nm, 3000 nm, 3010 nm, 3020 nm, 3030 nm, 3040 nm, 3050 nm, 3060 nm, 3070 nm, 3080 nm, 3090 nm, 3100 nm, 3110 nm, 3120 nm, 3130 nm, 3140 nm, 3150 nm, 3160 nm, 3170 nm, 3180 nm, 3190 nm, 3200 nm, 3210 nm, 3220 nm, 3230 nm, 3240 nm, 3250 nm, 3260 nm, 3270 nm, 3280 nm, 3290 nm, 3300 nm, 3310 nm, 3320 nm, 3330 nm, 3340 nm, 3350 nm, 3360 nm, 3370 nm, 3380 nm, 3390 nm, 3400 nm, 3410 nm, 3420 nm, 3430 nm, 3440 nm, 3450 nm, 3460 nm, 3470 nm, 3480 nm, 3490 nm, 3500 nm, 3510 nm, 3520 nm, 3530 nm, 3540 nm, 3550 nm, 3560 nm, 3570 nm, 3580 nm, 3590 nm, 3600 nm, 3610 nm, 3620 nm, 3630 nm, 3640 nm, 3650 nm, 3660 nm, 3670 nm, 3680 nm, 3690 nm, 3700 nm, 3710 nm, 3720 nm, 3730 nm, 3740 nm, 3750 nm, 3760 nm, 3770 nm, 3780 nm, 3790 nm, 3800 nm, 3810 nm, 3820 nm, 3830 nm, 3840 nm, 3850 nm, 3860 nm, 3870 nm, 3880 nm, 3890 nm, 3900 nm, 3910 nm, 3920 nm, 3930 nm, 3940 nm, 3950 nm, 3960 nm, 3970 nm, 3980 nm, 3990 nm, 4000 nm, 4010 nm, 4020 nm, 4030 nm, 4040 nm, 4050 nm, 4060 nm, 4070 nm, 4080 nm, 4090 nm, 4100 nm, 4110 nm, 4120 nm, 4130 nm, 4140 nm, 4150 nm, 4160 nm, 4170 nm, 4180 nm, 4190 nm, 4200 nm, 4210 nm, 4220 nm, 4230 nm, 4240 nm, 4250 nm, 4260 nm, 4270 nm, 4280 nm, 4290 nm, 4300 nm, 4310 nm, 4320 nm, 4330 nm, 4340 nm, 4350 nm, 4360 nm, 4370 nm, 4380 nm, 4390 nm, 4400 nm, 4410 nm, 4420 nm, 4430 nm, 4440 nm, 4450 nm, 4460 nm, 4470 nm, 4480 nm, 4490 nm, 4500 nm, 4510 nm, 4520 nm, 4530 nm, 4540 nm, 4550 nm, 4560 nm, 4570 nm, 4580 nm, 4590 nm, 4600 nm, 4610 nm, 4620 nm, 4630 nm, 4640 nm, 4650 nm, 4660 nm, 4670 nm, 4680 nm, 4690 nm, 4700 nm, 4710 nm, 4720 nm, 4730 nm, 4740 nm, 4750 nm, 4760 nm, 4770 nm, 4780 nm, 4790 nm, 4800 nm, 4810 nm, 4820 nm, 4830 nm, 4840 nm, 4850 nm, 4860 nm, 4870 nm, 4880 nm, 4890 nm, 4900 nm, 4910 nm, 4920 nm, 4930 nm, 4940 nm, 4950 nm, 4960 nm, 4970 nm, 4980 nm, 4990 nm, 5000 nm, 5010 nm, 5020 nm, 5030 nm, 5040 nm, 5050 nm, 5060 nm, 5070 nm, 5080 nm, 5090 nm, 5100 nm, 5110 nm, 5120 nm, 5130 nm, 5140 nm, 5150 nm, 5160 nm, 5170 nm, 5180 nm, 5190 nm, 5200 nm, 5210 nm, 5220 nm, 5230 nm, 5240 nm, 5250 nm, 5260 nm, 5270 nm, 5280 nm, 5290 nm, 5300 nm, 5310 nm, 5320 nm, 5330 nm, 5340 nm, 5350 nm, 5360 nm, 5370 nm, 5380 nm, 5390 nm, 5400 nm, 5410 nm, 5420 nm, 5430 nm, 5440 nm, 5450 nm, 5460 nm, 5470 nm, 5480 nm, 5490 nm, 5500 nm, 5510 nm, 5520 nm, 5530 nm, 5540 nm, 5550 nm, 5560 nm, 5570 nm, 5580 nm, 5590 nm, 5600 nm, 5610 nm, 5620 nm, 5630 nm, 5640 nm, 5650 nm, 5660 nm, 5670 nm, 5680 nm, 5690 nm, 5700 nm, 5710 nm, 5720 nm, 5730 nm, 5740 nm, 5750 nm, 5760 nm, 5770 nm, 5780 nm, 5790 nm, 5800 nm, 5810 nm, 5820 nm, 5830 nm, 5840 nm, 5850 nm, 5860 nm, 5870 nm, 5880 nm, 5890 nm, 5900 nm, 5910 nm, 5920 nm, 5930 nm, 5940 nm, 5950 nm, 5960 nm, 5970 nm, 5980 nm, 5990 nm, 6000 nm, 6010 nm, 6020 nm, 6030 nm, 6040 nm, 6050 nm, 6060 nm, 6070 nm, 6080 nm, 6090 nm, 6100 nm, 6110 nm, 6120 nm, 6130 nm, 6140 nm, 6150 nm, 6160 nm, 6170 nm, 6180 nm, 6190 nm, 6200 nm, 6210 nm, 6220 nm, 6230 nm, 6240 nm, 6250 nm, 6260 nm, 6270 nm, 6280 nm, 6290 nm, 6300 nm, 6310 nm, 6320 nm, 6330 nm, 6340 nm, 6350 nm, 6360 nm, 6370 nm, 6380 nm, 6390 nm, 6400 nm, 6410 nm, 6420 nm, 6430 nm, 6440 nm, 6450 nm, 6460 nm, 6470 nm, 6480 nm, 6490 nm, 6500 nm, 6510 nm, 6520 nm, 6530 nm, 6540 nm, 6550 nm, 6560 nm, 6570 nm, 6580 nm, 6590 nm, 6600 nm, 6610 nm, 6620 nm, 6630 nm, 6640 nm, 6650 nm, 6660 nm, 6670 nm, 6680 nm, 6690 nm, 6700 nm, 6710 nm, 6720 nm, 6730 nm, 6740 nm, 6750 nm, 6760 nm, 6770 nm, 6780 nm, 6790 nm, 6800 nm, 6810 nm, 6820 nm, 6830 nm, 6840 nm, 6850 nm, 6860 nm, 6870 nm, 6880 nm, 6890 nm, 6900 nm, 6910 nm, 6920 nm, 6930 nm, 6940 nm, 6950 nm, 6960 nm, 6970 nm, 6980 nm, 6990 nm, 7000 nm, 7010 nm, 7020 nm, 7030 nm, 7040 nm, 7050 nm, 7060 nm, 7070 nm, 7080 nm, 7090 nm, 7100 nm, 7110 nm, 7120 nm, 7130 nm, 7140 nm, 7150 nm, 7160 nm, 7170 nm, 7180 nm, 7190 nm, 7200 nm, 7210 nm, 7220 nm, 7230 nm, 7240 nm, 7250 nm, 7260 nm, 7270 nm, 7280 nm, 7290 nm, 7300 nm, 7310 nm, 7320 nm, 7330 nm, 7340 nm, 7350 nm, 7360 nm, 7370 nm, 7380 nm, 7390 nm, 7400 nm, 7410 nm, 7420 nm, 7430 nm, 7440 nm, 7450 nm, 7460 nm, 7470 nm, 7480 nm, 7490 nm, 7500 nm, 7510 nm, 7520 nm, 7530 nm, 7540 nm, 7550 nm, 7560 nm, 7570 nm, 7580 nm, 7590 nm, 7600 nm, 7610 nm, 7620 nm, 7630 nm, 7640 nm, 7650 nm, 7660 nm, 7670 nm, 7680 nm, 7690 nm, 7700 nm, 7710 nm, 7720 nm, 7730 nm, 7740 nm, 7750 nm, 7760 nm, 7770 nm, 7780 nm, 7790 nm, 7800 nm, 7810 nm, 7820 nm, 7830 nm, 7840 nm, 7850 nm, 7860 nm, 7870 nm, 7880 nm, 7890 nm, 7900 nm, 7910 nm, 7920 nm, 7930 nm, 7940 nm, 7950 nm, 7960 nm, 7970 nm, 7980 nm, 7990 nm, 8000 nm, 8010 nm, 8020 nm, 8030 nm, 8040 nm, 8050 nm, 8060 nm, 8070 nm, 8080 nm, 8090 nm, 8100 nm, 8110 nm, 8120 nm, 8130 nm, 8140 nm, 8150 nm, 8160 nm, 8170 nm, 8180 nm, 8190 nm, 8200 nm, 8210 nm, 8220 nm, 8230 nm, 8240 nm, 8250 nm, 8260 nm, 8270 nm, 8280 nm, 8290 nm, 8300 nm, 8310 nm, 8320 nm, 8330 nm, 8340 nm, 8350 nm, 8360 nm, 8370 nm, 8380 nm, 8390 nm, 8400 nm, 8410 nm, 8420 nm, 8430 nm, 8440 nm, 8450 nm, 8460 nm, 8470 nm, 8480 nm, 8490 nm, 8500 nm, 8510 nm, 8520 nm, 8530 nm, 8540 nm, 8550 nm, 8560 nm, 8570 nm, 8580 nm, 8590 nm, 8600 nm, 8610 nm, 8620 nm, 8630 nm, 8640 nm, 8650 nm, 8660 nm, 8670 nm, 8680 nm, 8690 nm, 8700 nm, 8710 nm, 8720 nm, 8730 nm, 8740 nm, 8750 nm, 8760 nm, 8770 nm, 8780 nm, 8790 nm, 8800 nm, 8810 nm, 8820 nm, 8830 nm, 8840 nm, 8850 nm, 8860 nm, 8870 nm, 8880 nm, 8890 nm, 8900 nm, 8910 nm, 8920 nm, 8930 nm, 8940 nm, 8950 nm, 8960 nm, 8970 nm, 8980 nm, 8990 nm, 9000 nm, 9010 nm, 9020 nm, 9030 nm, 9040 nm, 9050 nm, 9060 nm, 9070 nm, 9080 nm, 9090 nm, 9100 nm, 9110 nm, 9120 nm, 9130 nm, 9140 nm, 9150 nm, 9160 nm, 9170 nm, 9180 nm, 9190 nm, 9200 nm, 9210 nm, 9220 nm, 9230 nm, 9240 nm, 9250 nm, 9260 nm, 9270 nm, 9280 nm, 9290 nm, 9300 nm, 9310 nm, 9320 nm, 9330 nm, 9340 nm, 9350 nm, 9360 nm, 9370 nm, 9380 nm, 9390 nm, 9400 nm, 9410 nm, 9420 nm, 9430 nm, 9440 nm, 9450 nm, 9460 nm, 9470 nm, 9480 nm, 9490 nm, 9500 nm, 9510 nm, 9520 nm, 9530 nm, 9540 nm, 9550 nm, 9560 nm, 9570 nm, 9580 nm, 9590 nm, 9600 nm, 9610 nm, 9620 nm, 9630 nm, 9640 nm, 9650 nm, 9660 nm, 9670 nm, 9680 nm, 9690 nm, 9700 nm, 9710 nm, 9720 nm, 9730 nm, 9740 nm, 9750 nm, 9760 nm, 9770 nm, 9780 nm, 9790 nm, 9800 nm, 9810 nm, 9820 nm, 9830 nm, 9840 nm, 9850 nm, 9860 nm, 9870 nm, 9880 nm, 9890 nm, 9900 nm, 9910 nm, 9920 nm, 9930 nm, 9940 nm, 9950 nm, 9960 nm, 9970 nm, 9980 nm, 9990 nm, 10000 nm, 10010 nm, 10020 nm, 10030 nm, 10040 nm, 10050 nm, 10060 nm, 10070 nm, 10080 nm, 10090 nm, 10100 nm, 10110 nm, 10120 nm, 10130 nm, 10140 nm, 10150 nm, 10160 nm, 10170 nm, 10180 nm, 10190 nm, 10200 nm, 10210 nm, 10220 nm, 10230 nm, 10240 nm, 10250 nm, 10260 nm, 10270 nm, 10280 nm, 10290 nm, 10300 nm, 10310 nm, 10320 nm, 10330 nm, 10340 nm, 10350 nm, 10360 nm, 10370 nm, 10380 nm, 10390 nm, 10400 nm, 10410 nm, 10420 nm, 10430 nm, 10440 nm, 10450 nm, 10460 nm, 10470 nm, 10480 nm, 10490 nm, 10500 nm, 10510 nm, 10520 nm, 10530 nm, 10540 nm, 10550 nm, 10560 nm, 10570 nm, 10580 nm, 10590 nm, 10600 nm, 10610 nm, 10620 nm, 10630 nm, 10640 nm, 10650 nm, 10660 nm, 10670 nm, 10680 nm, 10690 nm, 10700 nm, 10710 nm, 10720 nm, 10730 nm, 10740 nm, 10750 nm, 10760 nm, 10770 nm, 10780 nm, 10790 nm, 10800 nm, 10810 nm, 10820 nm, 10830 nm, 10840 nm, 10850 nm, 10860 nm, 10870 nm, 10880 nm, 10890 nm, 10900 nm, 10910 nm, 10920 nm, 10930 nm, 10940 nm, 10950 nm, 10960 nm, 10970 nm, 10980 nm, 10990 nm, 11000 nm, 11010 nm, 11020 nm, 11030 nm, 11040 nm, 11050 nm, 11060 nm, 11070 nm, 11080 nm, 11090 nm, 11100 nm, 11110 nm, 11120 nm, 11130 nm, 11140 nm, 11150 nm, 11160 nm, 11170 nm, 11180 nm, 11190 nm, 11200 nm, 11210 nm, 11220 nm, 11230 nm, 11240 nm, 11250 nm, 11260 nm, 11270 nm, 11280 nm, 11290 nm, 11300 nm, 11310 nm, 11320 nm, 11330 nm, 11340 nm, 11350 nm, 11360 nm, 11370 nm, 11380 nm, 11390 nm, 11400 nm, 11410 nm, 11420 nm, 11430 nm, 11440 nm, 11450 nm, 11460 nm, 11470 nm, 11480 nm, 11490 nm, 11500 nm, 11510 nm, 11520 nm, 11530 nm, 11540 nm, 11550 nm, 11560 nm, 11570 nm, 11580 nm, 11590 nm, 11600 nm, 11610 nm, 11620 nm, 11630 nm, 11640 nm, 11650 nm, 11660 nm, 11670 nm, 11680 nm, 11690 nm, 11700 nm, 11710 nm, 11720 nm, 11730 nm, 11740 nm, 11750 nm, 11760 nm, 11770 nm, 11780 nm, 11790 nm, 11800 nm, 11810 nm, 11820 nm, 11830 nm, 11840 nm, 11850 nm, 11860 nm, 11870 nm, 11880 nm, 11890 nm, 11900 nm, 11910 nm, 11920 nm, 11930 nm, 11940 nm, 11950 nm, 11960 nm, 11970 nm, 11980 nm, 11990 nm, 12000 nm, 12010 nm, 12020 nm, 12030 nm, 12040 nm, 12050 nm, 12060 nm, 12070 nm, 12080 nm, 12090 nm, 12100 nm, 12110 nm, 12120 nm, 12130 nm, 12140 nm, 12150 nm, 12160 nm, 12170 nm, 12180 nm, 12190 nm, 12200 nm, 12210 nm, 12220 nm, 12230 nm, 12240 nm, 12250 nm, 12260 nm, 12270 nm, 12280 nm, 12290 nm, 12300 nm, 12310 nm, 12320 nm, 12330 nm, 12340 nm, 12350 nm, 12360 nm, 12370 nm, 12380 nm, 12390 nm, 12400 nm, 12410 nm, 12420 nm, 12430 nm, 12440 nm, 12450 nm, 12460 nm, 12470 nm, 12480 nm, 12490 nm, 12500 nm, 12510 nm, 12520 nm, 12530 nm, 12540 nm, 12550 nm, 12560 nm, 12570 nm, 12580 nm, 12590 nm, 12600 nm, 12610 nm, 12620 nm, 12630 nm, 12640 nm, 12650 nm, 12660 nm, 12670 nm, 12680 nm, 12690 nm, 12700 nm, 12710 nm, 12720 nm, 12730 nm, 12740 nm, 12750 nm, 12760 nm, 12770 nm, 12780 nm, 12790 nm, 12800 nm, 12810 nm, 12820 nm, 12830 nm, 12840 nm, 12850 nm, 12860 nm, 12870 nm, 12880 nm, 12890 nm, 12900 nm, 12910 nm, 12920 nm, 12930 nm, 12940 nm, 12950 nm, 12960 nm, 12970 nm, 12980 nm, 12990 nm, 13000 nm, 13010 nm, 13020 nm, 13030 nm, 13040 nm, 13050 nm, 13060 nm, 13070 nm, 13080 nm, 13090 nm, 13100 nm, 13110 nm, 13120 nm, 13130 nm, 13140 nm, 13150 nm, 13160 nm, 13170 nm, 13180 nm, 13190 nm, 13200 nm, 13210 nm, 13220 nm, 13230 nm, 13240 nm, 13250 nm, 13260 nm, 13270 nm, 13280 nm, 13290 nm, 13300 nm, 13310 nm, 13320 nm, 13330 nm, 13340 nm, 13350 nm, 13360 nm, 13370 nm, 13380 nm, 13390 nm, 13400 nm, 13410 nm, 13420 nm, 13430 nm, 13440 nm, 13450 nm, 13460 nm, 13470 nm, 13480 nm, 13490 nm, 13500 nm, 13510 nm, 13520 nm, 13530 nm, 13540 nm, 13550 nm, 13560 nm, 13570 nm, 13580 nm, 13590 nm, 13600 nm, 13610 nm, 13620 nm, 13630 nm, 13640 nm, 13650 nm, 13660 nm, 13670 nm, 13680 nm, 13690 nm, 13700 nm, 13710 nm, 13720 nm, 13730 nm, 13740 nm, 13750 nm, 13760 nm, 13770 nm, 13780 nm, 13790 nm, 13800 nm, 13810 nm, 13820 nm, 13830 nm, 13840 nm, 13850 nm, 13860 nm, 13870 nm, 13880 nm, 13890 nm, 13900 nm, 13910 nm, 13920 nm, 13930 nm, 13940 nm, 13950 nm, 13960 nm, 13970 nm, 13980 nm, 13990 nm, 14000 nm, 14010 nm, 14020 nm, 14030 nm, 14040 nm, 14050 nm, 14060 nm, 14070 nm, 14080 nm, 14090 nm, 14100 nm, 14110 nm, 14120 nm, 14130 nm, 14140 nm, 14150 nm, 14160 nm, 14170 nm, 14180 nm, 14190 nm, 14200 nm, 14210 nm, 14220 nm, 14230 nm, 14240 nm, 14250 nm, 14260 nm, 14270 nm, 14280 nm, 14290 nm, 14300 nm, 14310 nm, 14320 nm, 14330 nm, 14340 nm, 14350 nm, 14360 nm, 14370 nm, 14380 nm, 14390 nm, 14400 nm, 14410 nm, 14420 nm, 14430 nm, 14440 nm, 14450 nm, 14460 nm, 14470 nm, 14480 nm, 14490 nm, 14500 nm, 14510 nm, 14520 nm, 14530 nm, 14540 nm, 14550 nm, 14560 nm, 14570 nm, 14580 nm, 14590 nm, 14600 nm, 14610 nm, 14620 nm, 14630 nm, 14640 nm, 14650 nm, 14660 nm, 14670 nm, 14680 nm, 14690 nm, 14700 nm, 14710 nm, 14720 nm, 14730 nm, 14740 nm, 14750 nm, 14760 nm, 14770 nm, 14780 nm, 14790 nm, 14800 nm, 14810 nm, 14820 nm, 14830 nm, 14840 nm, 14850 nm, 14860 nm, 14870 nm, 14880 nm, 14890 nm, 14900 nm, 14910 nm, 14920 nm, 14930 nm, 14940 nm, 14950 nm, 14960 nm, 14970 nm, 14980 nm, 14990 nm, 15000 nm, 15010 nm, 15020 nm, 15030 nm, 15040 nm, 15050 nm, 15060 nm, 15070 nm, 15080 nm, 15090 nm, 15100 nm, 15110 nm, 15120 nm, 15130 nm, 15140 nm, 15150 nm, 15160 nm, 15170 nm, 15180 nm, 15190 nm, 15200 nm, 15210 nm, 15220 nm, 15230 nm, 15240 nm, 15250 nm, 15260 nm, 15270 nm, 15280 nm, 15290 nm, 15300 nm, 15310 nm, 15320 nm, 15330 nm, 153