

Obsah

- ◆ Vlákňový laser (kontinuální a pulzní 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

Kontinuální vlákňové lasery

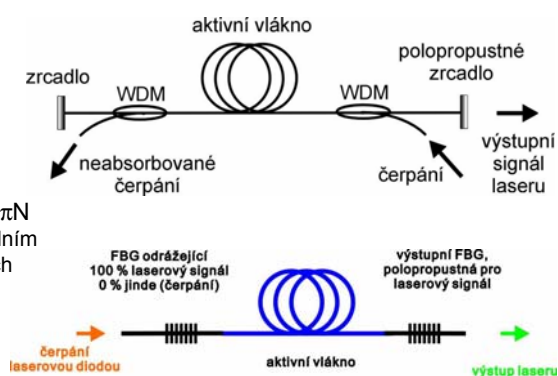
laser – optický oscilátor



podmínky laserových oscilací:

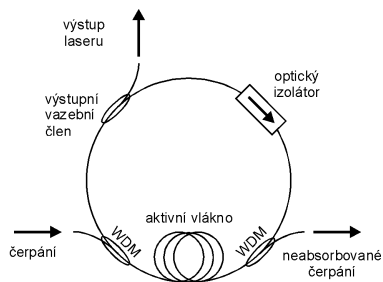
1. zisk aktivního média přesně kompenzuje ztráty rezonátoru
2. fázový synchronizmus $\Delta\varphi=2\beta L=2\pi N$
signál zpětné vazby je sfázován s původním vstupním signálem. Vzdálenost podélných módů F-P rezonátoru $\Delta\nu=c/2L$, např. $L=10\text{ m}$ $\Delta\nu=10\text{ MHz}$.
(srv. InGaAsP laser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

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

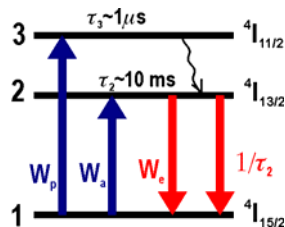


Kontinuální vláknové lasery

2. uspořádání rezonátoru:
kruhový rezonátor



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



rychlostní rovnice:

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

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

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

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

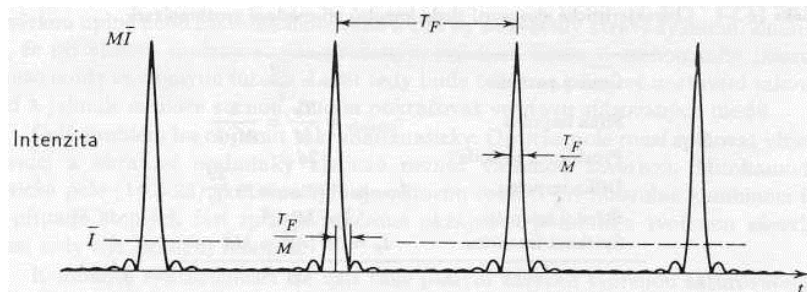
$$\frac{dP_s}{dt} = (N_2 - N_1)c\sigma_s \Gamma P_s - \frac{P_s}{\tau_c} + sp.em.$$

synchronizace módů – pulzní laser

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

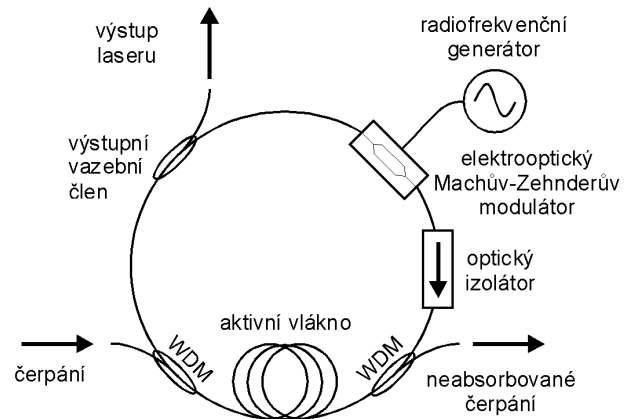
Do pásma zesílení erbia se vejde $M \sim 10^5$ módů (obvyklý režim: volně oscilující módy)

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

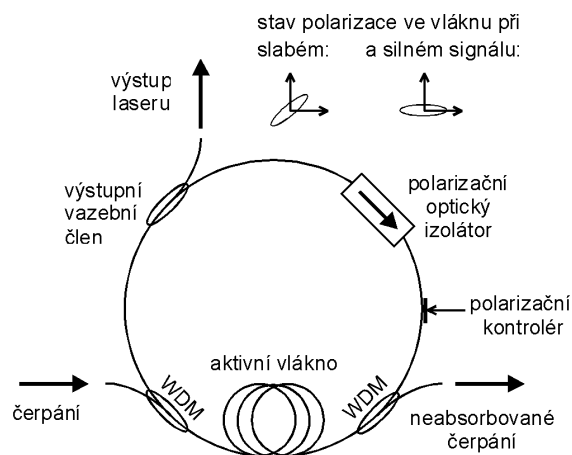


B. E. A. Saleh a M. C. Teich, "Základy fotoniky", kapitola 14: Lasery, Matfyzpress 1995

Aktivní modová synchronizace



Pasivní modová synchronizace



Femtosekundový vláknový laser

Pulsní laser s pasivní vidovou synchronizací díky nelineárnímu natáčení polarizace.

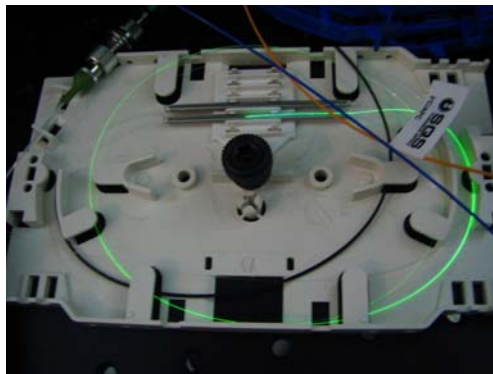
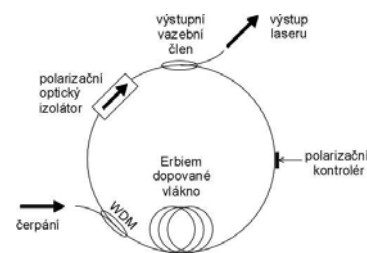
Šířka spektra: **13 nm**, $\lambda_s=1561$ nm

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



Femtosekundový vláknový laser

Pulsní laser s pasivní vidovou synchronizací díky nelineárnímu natáčení polarizace.

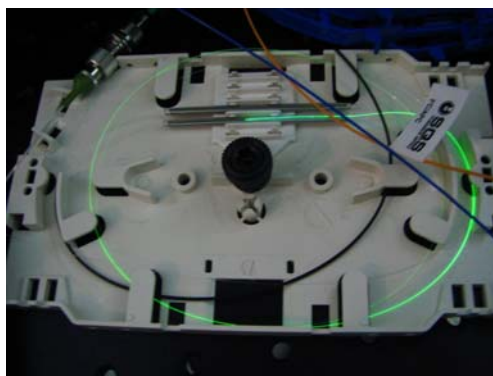
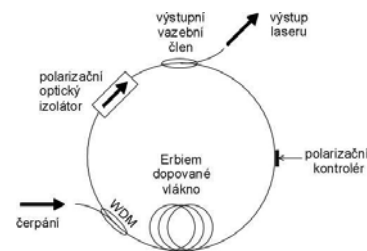
Šířka spektra: **13 nm**, $\lambda_s=1561$ nm

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

Opakovací frekvence: **39.68 MHz**

odpovídající perioda je **25.2 ns**

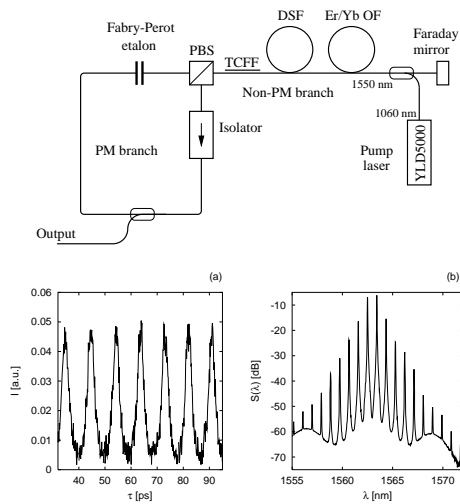
a délka rezonátoru **5.14 m**



| | |
|--|------------------|
| 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 |



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 dvoujádrovým vláknem (TCF):

$f=206$ GHz, šířka pulsu: **2.7 ps**

Q-klíčované vláknové lasery

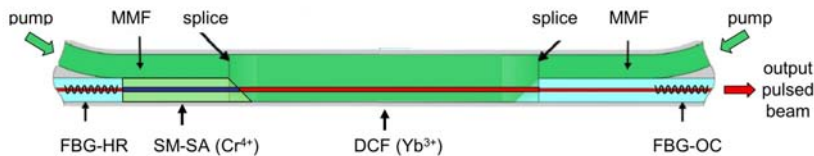
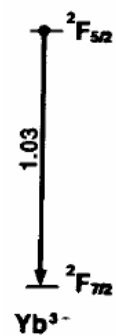
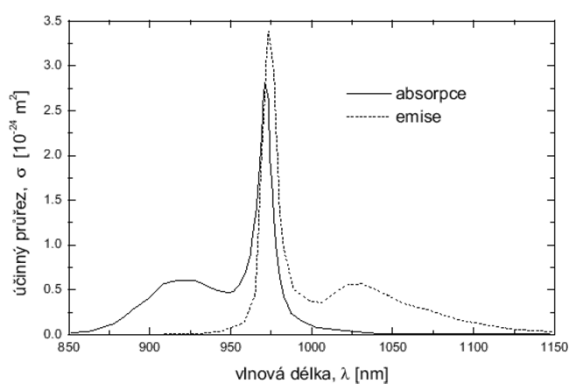


Fig. 2: example of linear Fabry-Perot PQS fibre laser based on the Yb³⁺:Cr⁴⁺ atomic system. DCF: Yb³⁺-doped ovale double-clad fibre; SM-SA: Cr⁴⁺-doped singlemode saturable absorber; MMF: pump carrying multimode fibre; FBG-HR: highly reflecting fibre Bragg grating mirror; FBG-OC: fibre Bragg grating output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

Další metody pasivního Q-klíčování: Carbon nanotubes, SESAM

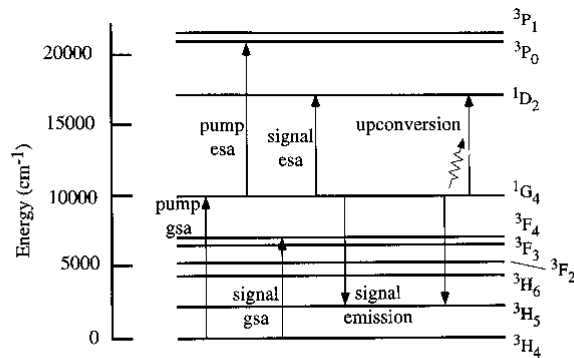
Vláknové lasery s jinými prvky vzácných zemin (Yb, Pr, Tm)

Yterbiem dopovaný vláknový laser



Absorpční a emisní spektrum yterbia v křemenném vlákně

Praseodymem dopovaným vláknový zesilovač (PDFA)

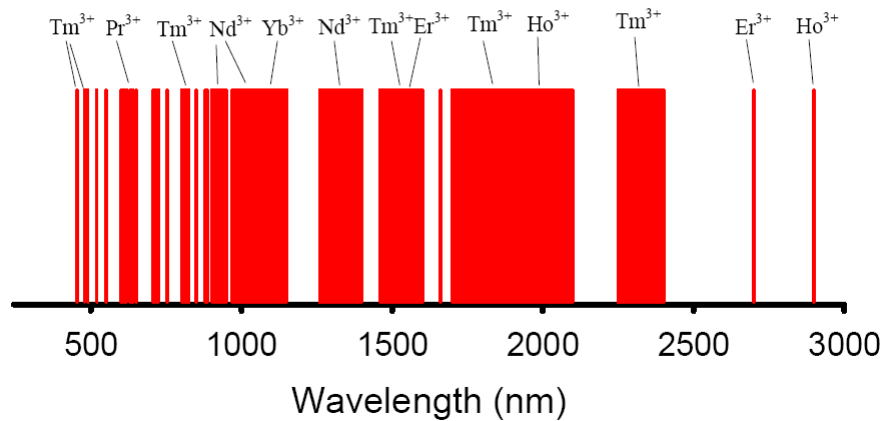


krátká doba života hladiny ¹G₄ v křemenných vláknech ⇒ nutnost používat fluoridová vlákna ($\tau \approx 110 \mu\text{s}$)

Figure 10.16: Radiative and energy transfer processes of Pr³⁺, included in an extended model of amplification at 1.3 μm in Pr³⁺-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 Pr³⁺-doped fluoride fiber amplifiers", JLT 7(3):299-302, 1995.

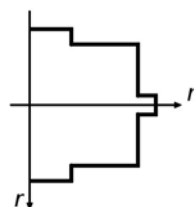
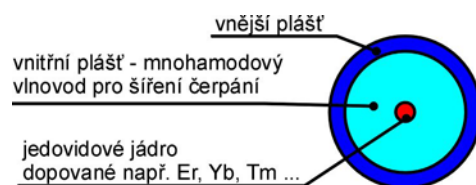
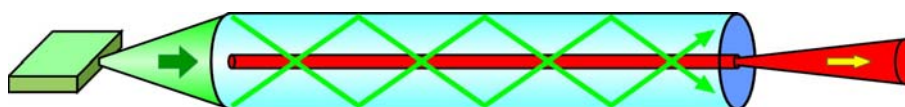
Operating wavelengths for rare-earth doped fiber lasers in silica and non-silica glasses



Vysoký výkon z vláknových laserů - metoda čerpání přes plášť

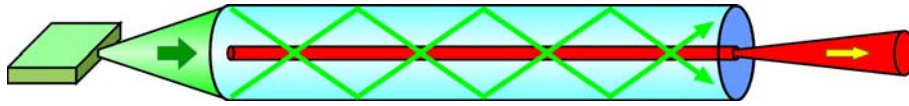
*Double-clad (DC), high-power fiber lasers
cladding pumping*

Čerpání přes plášť



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

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

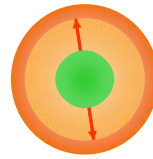
Hledání optimálního průřezu

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



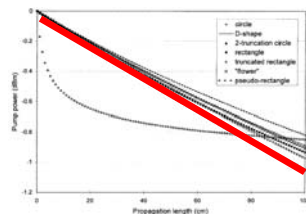
Kosé paprsky

Šroubovitá trajektorie
v projekci obecně
neuzavřený
mnohúhelník



Meridiánové paprsky

Trajektorie v rovině osy
vlákna



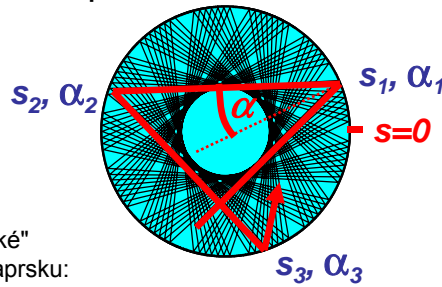
[Doya01] V. Doya, O. Legrand and F. Mortessagne, "Optimized absorption in a chaotic double-clad fiber amplifier", Opt. Lett., 26(12):872-874, 2001.

[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

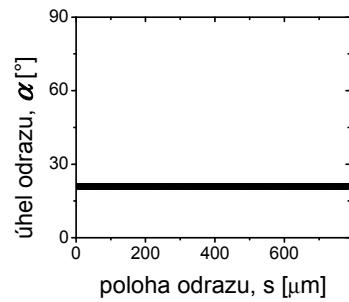
Hledání optimálního průřezu

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:**

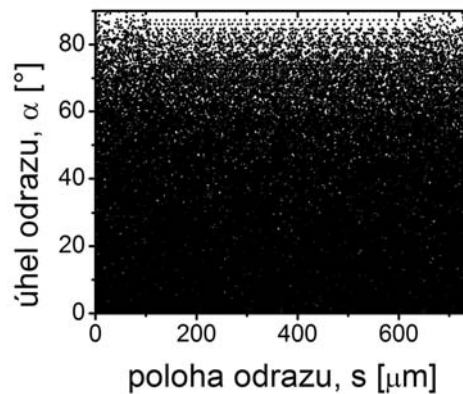
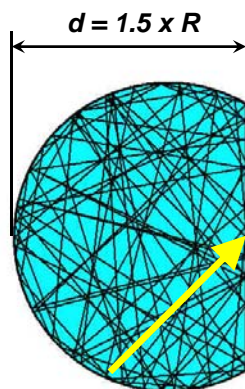


"chaotické"
šíření paprsku:
zaplněný fázový diagram s, α



Zkosený kruh: "D-tvar" vlákna

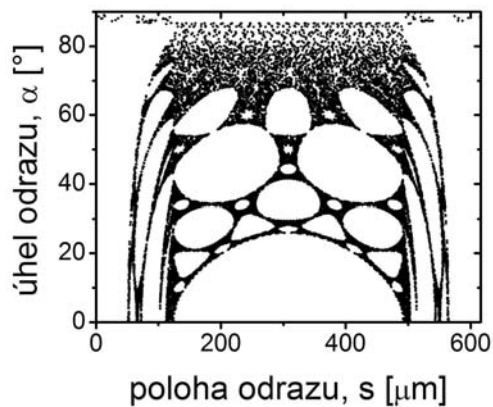
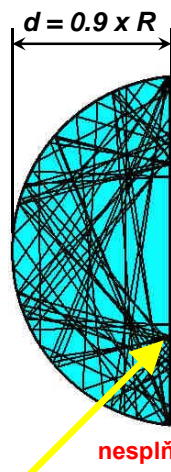
A. tloušťka vlákna $d > R$



splňuje podmínky chaotického šíření

Zkosený kruh: "D-tvar" vlákna

B. tloušťka vlákna $d < R$



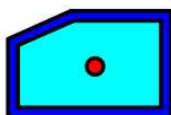
nesplňuje podmínky chaotického šíření

Ověřené optimální průřezy

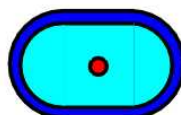
2x zkosený kruh



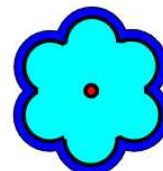
zkosený obdélník



"stadion"



"kytička"



splňují podmínky chaotického šíření

Další optimalizace absorpce

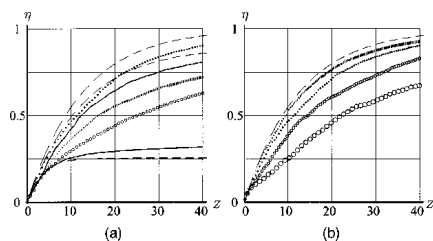
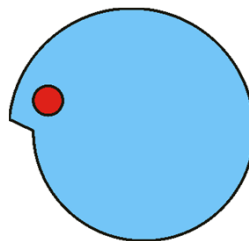


Fig. 3. (a) Efficiency η of absorption of the pump light in the core versus $Z = \kappa_0 z$. Upper dashed curve, case of ideal mixing (estimate by Eq. (9)); dotted curve, simulation of spiral cladding with displaced core; intermediate dashed curve, the analytical estimate by formula (10); upper solid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

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

Parametr kvality svazku: BPP

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

w ... poloměr svazku v krčku

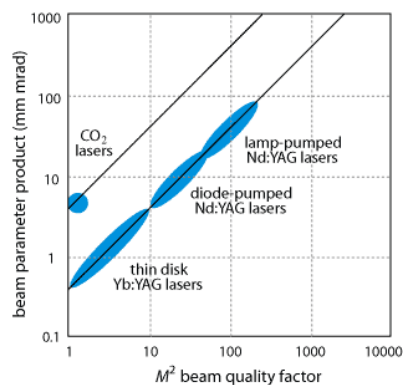
θ ... poloviční úhel divergence svazku měřený ve vzdáleném poli

čím větší BPP, tím méně kvalitní svazek

pro Gaussovský svazek platí

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

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



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) svazku [W/m²/Sr]

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

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 | → 1.47μm – 1.6μm | → Er ³⁺ |
| InGaAsP | → 1.8μm – 1.96μm | → Ho ³⁺ |

Diode laser types:

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

Emitter size ~1μm × few μm

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 ~0.5 – 0.8W (limited by catastrophic failure)

(b) Broad area diode lasers

Emitter size ~1μm × ~100μm

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 ~ 7 - 8W

(c) Diode-bars

Emitting region ~1μm × 10mm

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 ~ 40-120W



(d) Diode-stacks

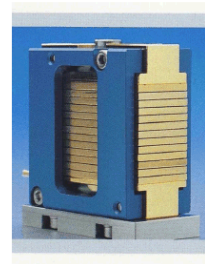
Emitter region ~ N × bar spacing × 10mm

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

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

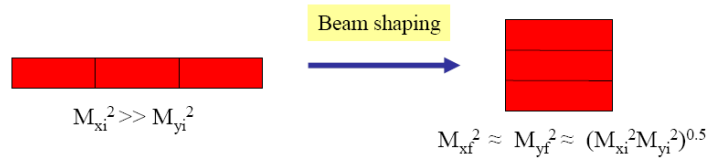
$$\text{and } M_x^2 \sim 1300-1800$$

Max. cw output power ~ 40-120W × N



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

Yterbiem dopovaný vláknový laser

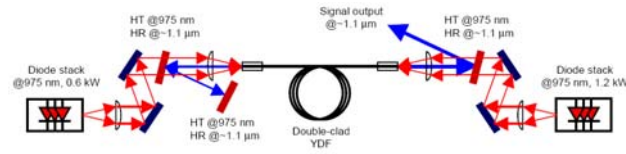


Fig. 1. YDFL experimental arrangement with two diode-stack pump sources.
HR: high reflectivity, HT: high transmission.

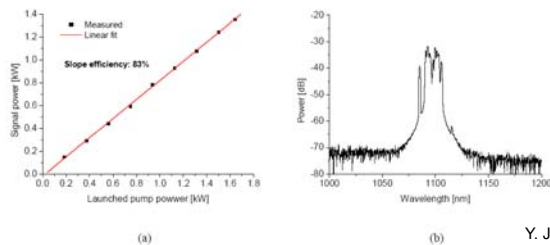


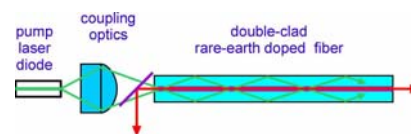
Fig. 2. (a) Fiber laser output power vs. launched pump power. (b) Laser output spectrum at full power.

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)

Metody napojení záření signálu a čerpání do jednoho dvouplášťového vlákna

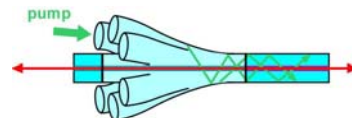
Způsoby navázání záření do vlákna

a) přímé navázání objemovými prvky
často využívané v laboratořích, nutnost nastavování



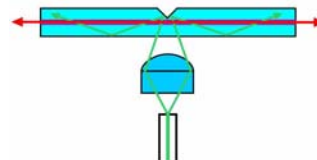
b) svazek vláken obsahující signálové vlákno a čerpací vlákno(a), např. svařovaný vazební člen

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

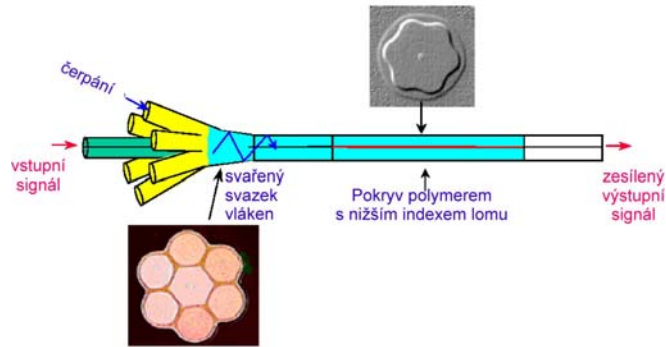
V-groove pumping: Goldberg L., El. Lett., 33 (1997) 2127.
Grating or prism coupling: Weber T. et al., Optics Comm., 115 (1995) 99.
Embedded-mirror side-pumping: Koplou J. P., JOE 39, (2003) 529.
Angle-polished fibers: Larsen J. J., Opt. Lett. 29 (2004) 436.



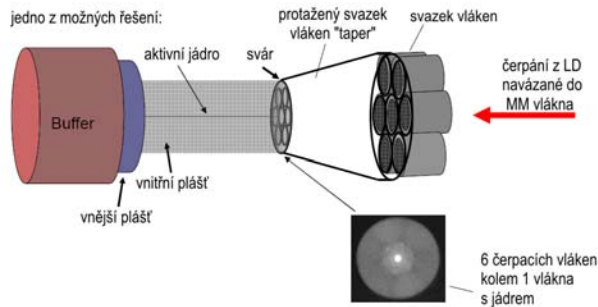
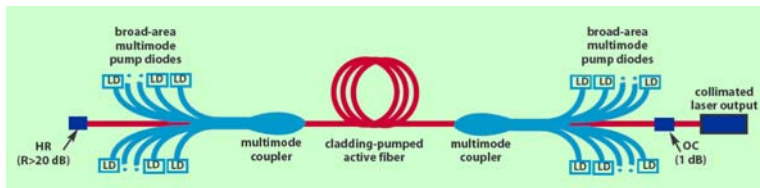
Způsoby navázání záření do vlákna

typ B) Lucent Technologies: "Star coupler"

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

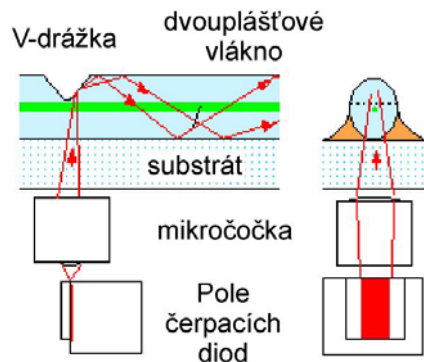


Způsoby navázání záření do vlákna - IPG



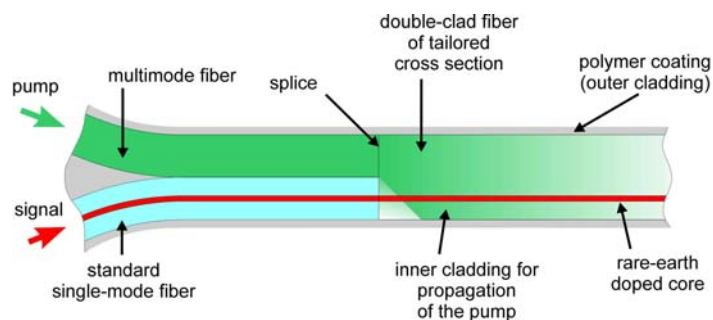
Způsoby navázání záření do vlákna

- 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 um 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)

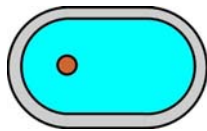
Způsoby navázání záření do vlákna



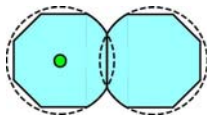
- **Požadavky na tvar průřezu DC vlákna:**
- 1. je co nejvíce podobný průřezu dvou vstupních vláken pro usnadnění sváru
- 2. zajišťuje optimální absorpci čerpání podél vlákna (chaotické trajektorie paprsků)

Příprava dvouplášťového vlákna

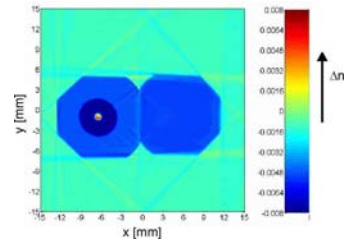
vybraný tvar průřezu "stadion"



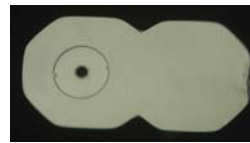
Realizace v praxi: spojení dvou preforem zbrúšených po stranách



Tomografické zobrazení průřezu a profilu indexu lomu typické preformy

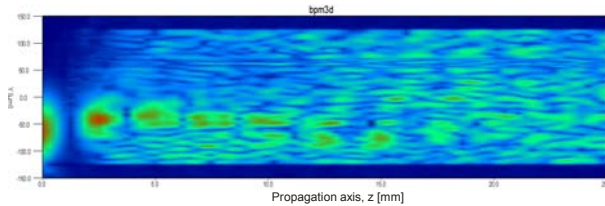


mikroskopická fotografie čela DC vlákna

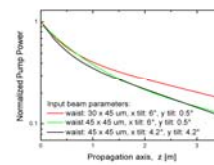


Šíření čerpání ve vnitřním plášti

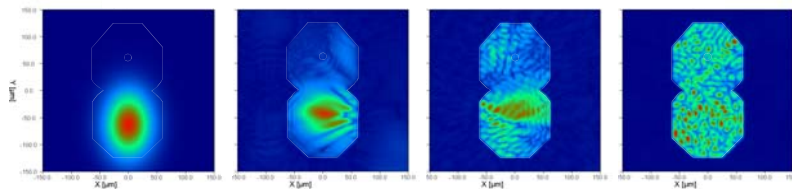
Pump intensity along the DC fiber, section $x=0 \mu\text{m}$



Pump absorption along the DC fiber

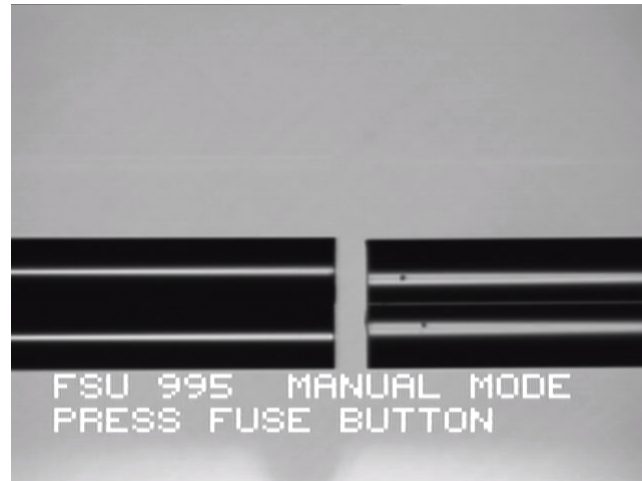


z=0 mm z=2.5 mm z=5 mm z=100 mm



Calculated by 3D beam propagation method, OlympIOs C2V software

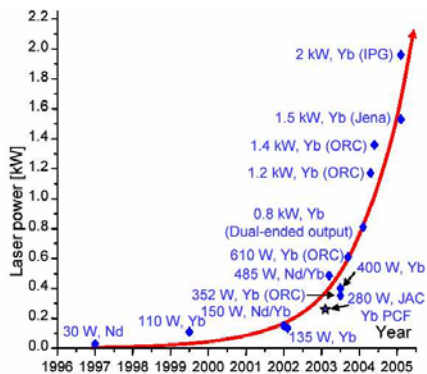
Sváření



Limity výstupního výkonu kontinuálních vláknových laserů

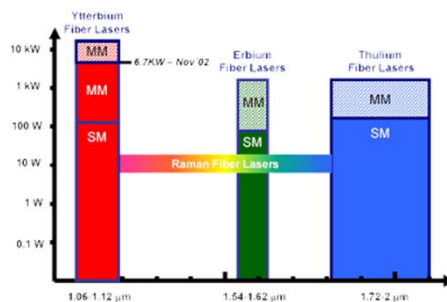
Power scaling limits of continuous wave YDFL

Pláštěm čerpané vláknové lasery



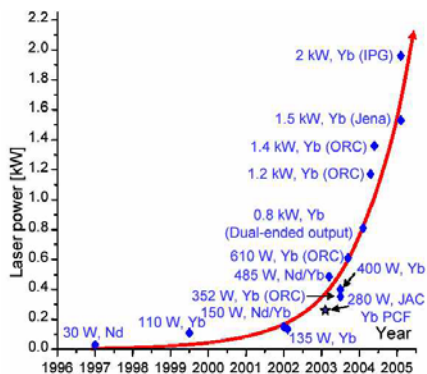
Pokroky ve zvyšování výstupního výkonu jednomódových Yb-vláknových laserů emitujících @1.1 μm .

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



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

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?

Zvyšování výkonu a zářivosti (jasu) spojováním svazků

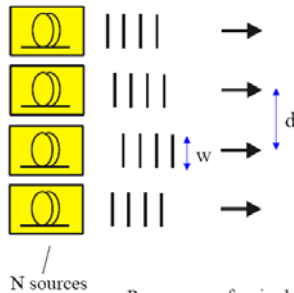
Power and brightness scaling via beam combination

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 $\rightarrow \theta_A = \theta_s$

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

$$\rightarrow P_A = N P_s$$

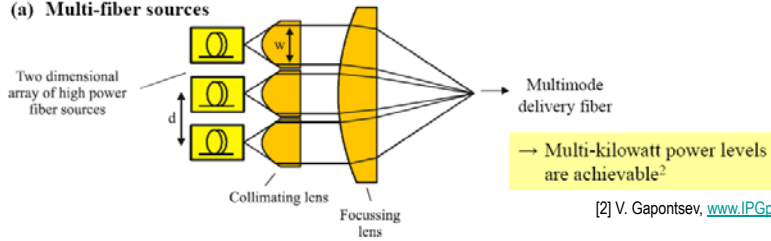
$$\rightarrow \frac{B_A}{B_s} \approx \frac{w}{d} = \eta_{\text{fill}}$$

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

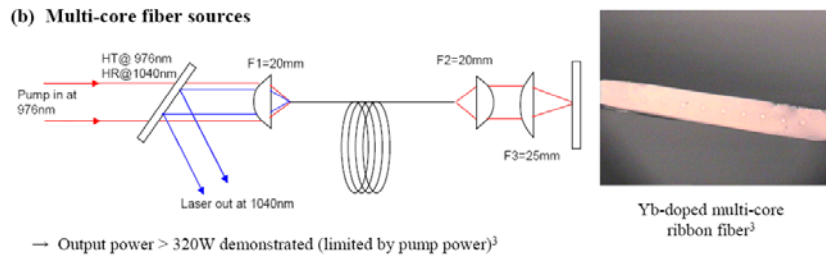
→ Simple and robust way to scale output power, but brightness cannot exceed the brightness of a single element

Examples:

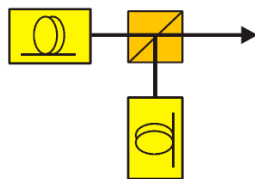
(a) Multi-fiber sources



(b) Multi-core fiber sources



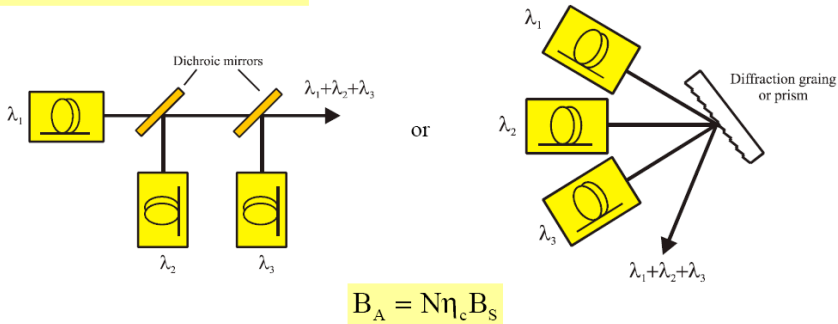
Polarization beam combining

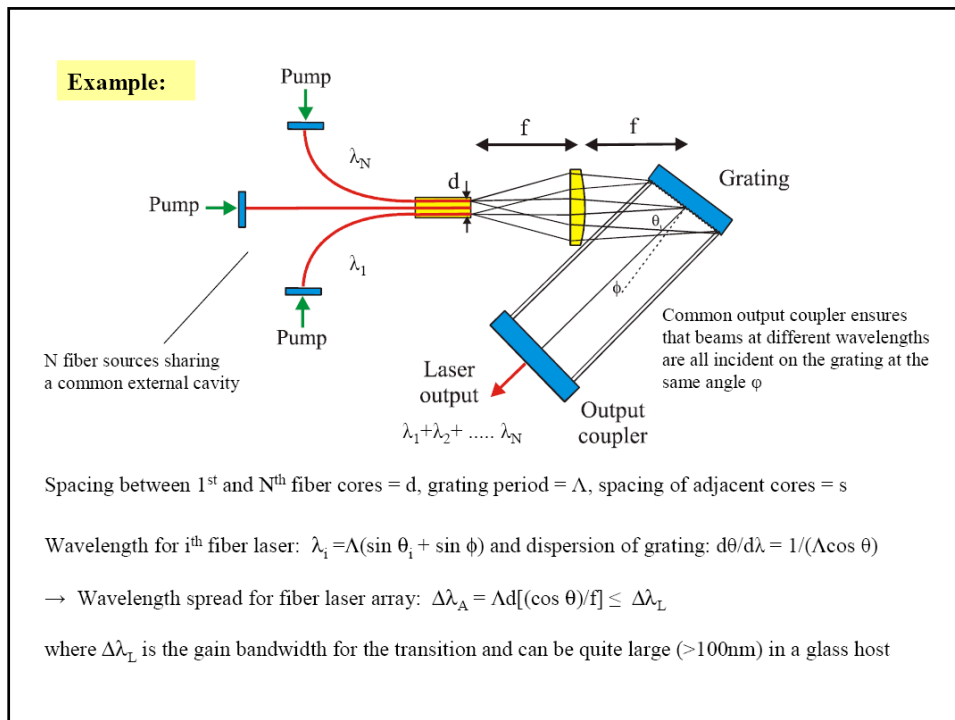


$$B_A = 2\eta_c B_S$$

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

Wavelength beam combining





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

Slunce:

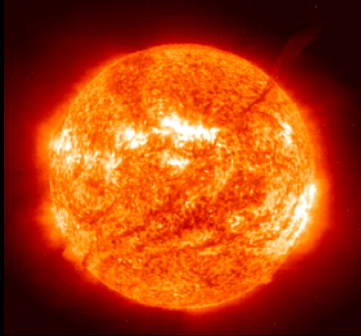
teplota slunečního povrchu: 5780 K

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 vlákne \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