

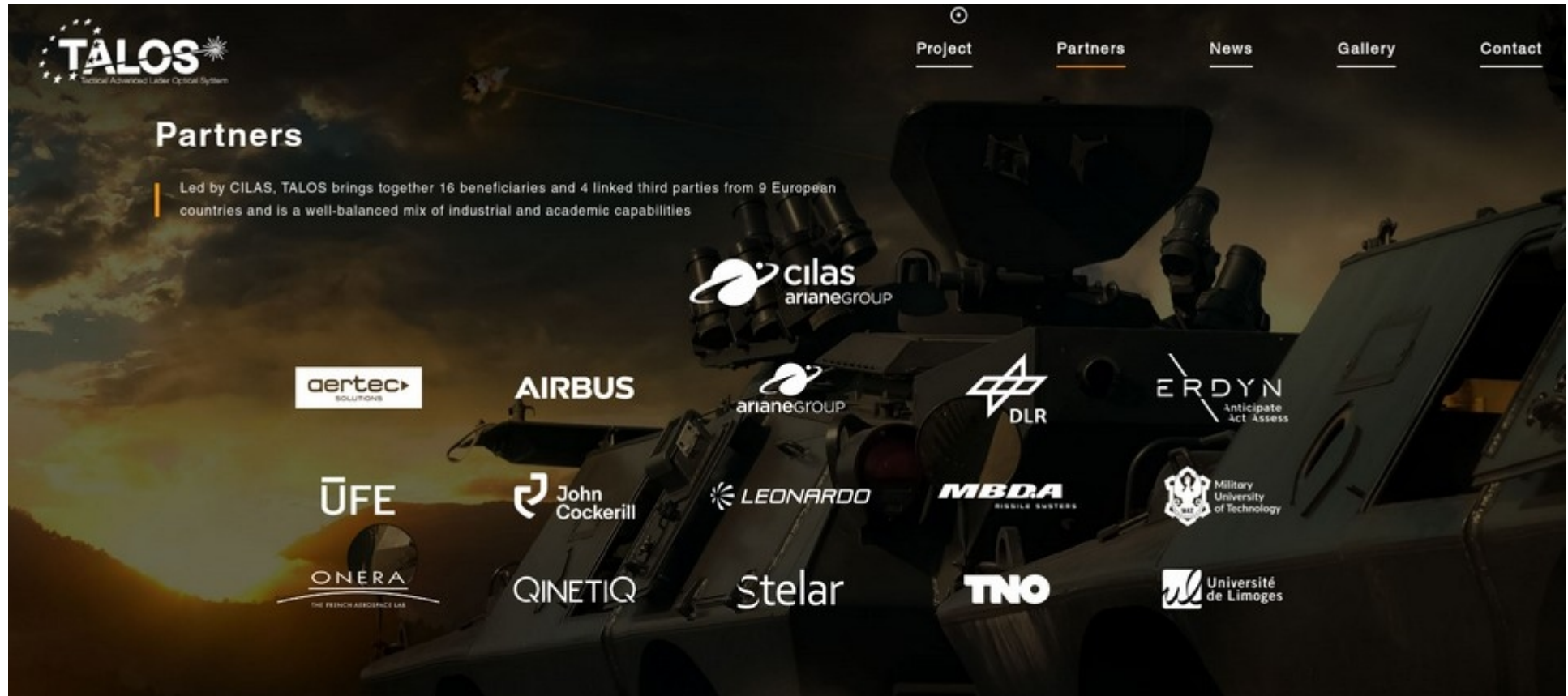
Výkonové vláknové lasery - ÚFE

Pavel Honzátka

*Ústav fotoniky a elektroniky AV ČR
Vláknové lasery a nelineární optika*

***Workshop Nové trendy využití laserů a přístrojové
techniky pro ozbrojené síly, 22. září 2022***

EDA - PROJECT TALOS (Tactical Advanced Laser Optical System)



source: <https://www.talos-padr.eu/index.php?p=partners>

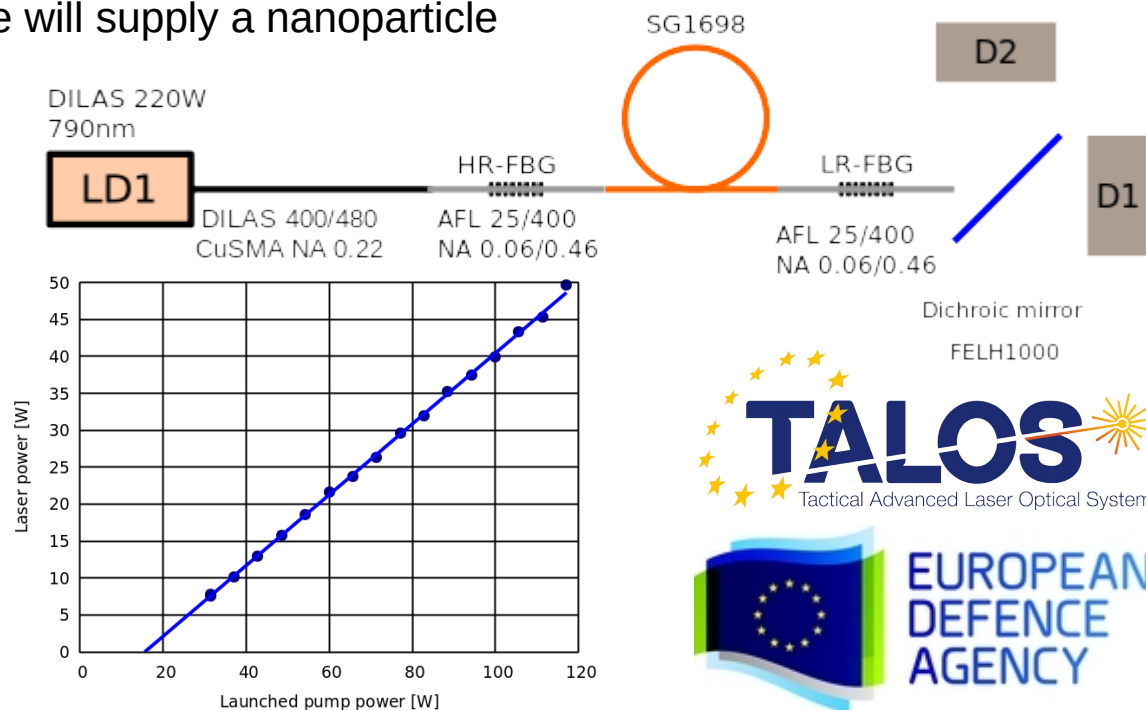
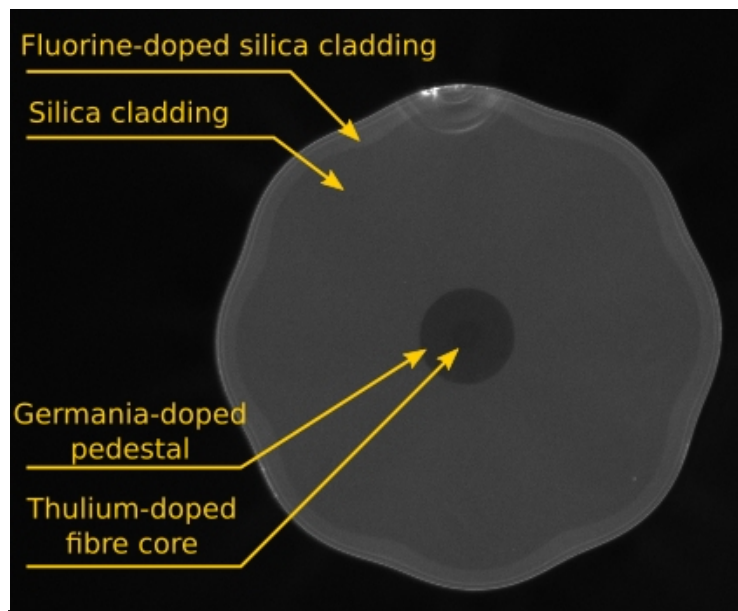
EDA - PROJECT TALOS (Tactical Advanced Laser Optical System)

Consortium of 15 European companies and academic institutions
led by the company CILAS of the Ariane group

2019-2023

P. Honzatko – member of the steering committee, coordinates one of
work packages

We developed a master oscillator and we will supply a nanoparticle
doped fibre into a high-power stage



OUTLINE

- Co je optické vlákno
- Vlákňové technologie v ÚFE
- Základní úvahy o vláknových LDEW
- Aktivity LDEW v Evropě a ve světě
- Klíčové faktory při vývoji LDEW

LDEW = Laser directed energy weapon



OPTICKÉ VLÁKNO

- Jádru – dopování GeO_2 – index lomu o 0.002-0.01 vyšší než u pláště. Efekt úplného vnitřního odrazu. Ztráty 0.2 dB/km ($\frac{1}{2}$ fotonů/15 km).

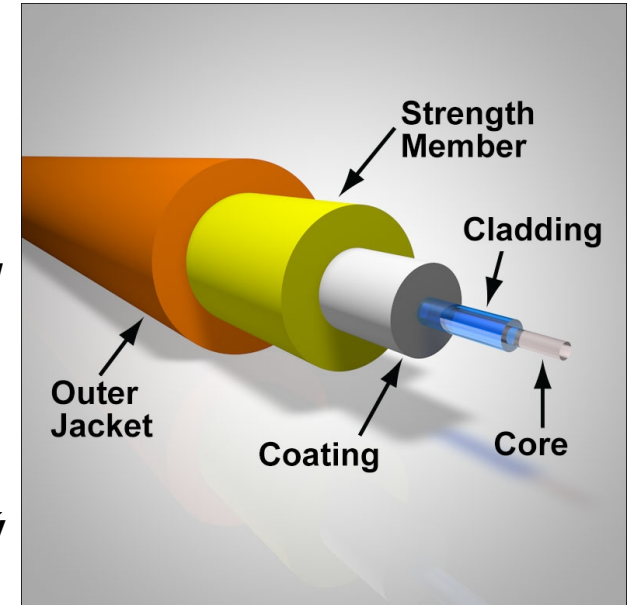
Dopování vzácnými zeminami:

Er_2O_3 – zesílení/generace - 1550 nm – telekomunikace

Yb_2O_3 - zesílení/generace - 1064 nm – velké výkony – průmysl, LDEW

Tm_2O_3 , Ho_2O_3 – zesílení/generace – 1950-2150 nm – medicína, LDEW

- Plášť – zpravidla nedopovaný křemen, index lomu 1.44 @ 1550 nm.
- Pokryv – polymer – ochranná funkce, příp. optická funkce (fluorovaný akrylát) – vnější optický plášť dvouplášťových vláken



Source: <https://www.thorlabs.com>

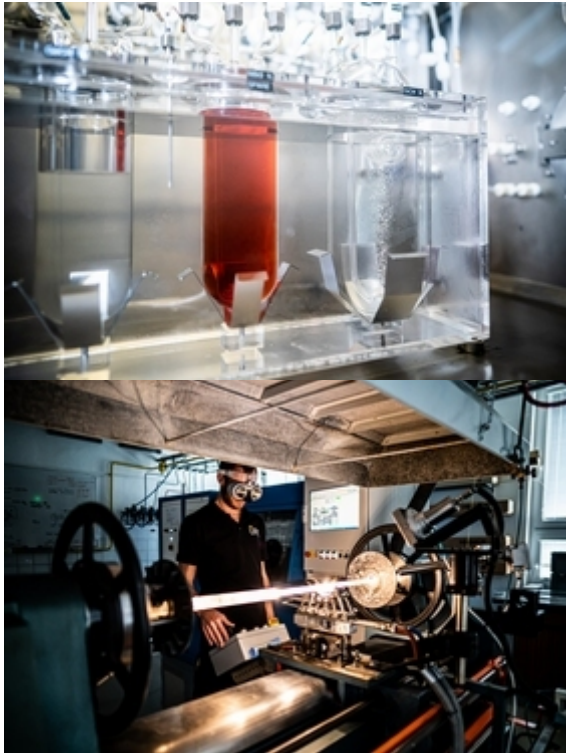
Základní přednosti vláknových laserů:

- Dobré chlazení (velký povrch/aktivní objem) → přenos/generace velkého výkonu
- Difrakčně limitovaný svazek – lze sfokusovat na dálku, příp. na malou plochu

FILANO FACILITIES

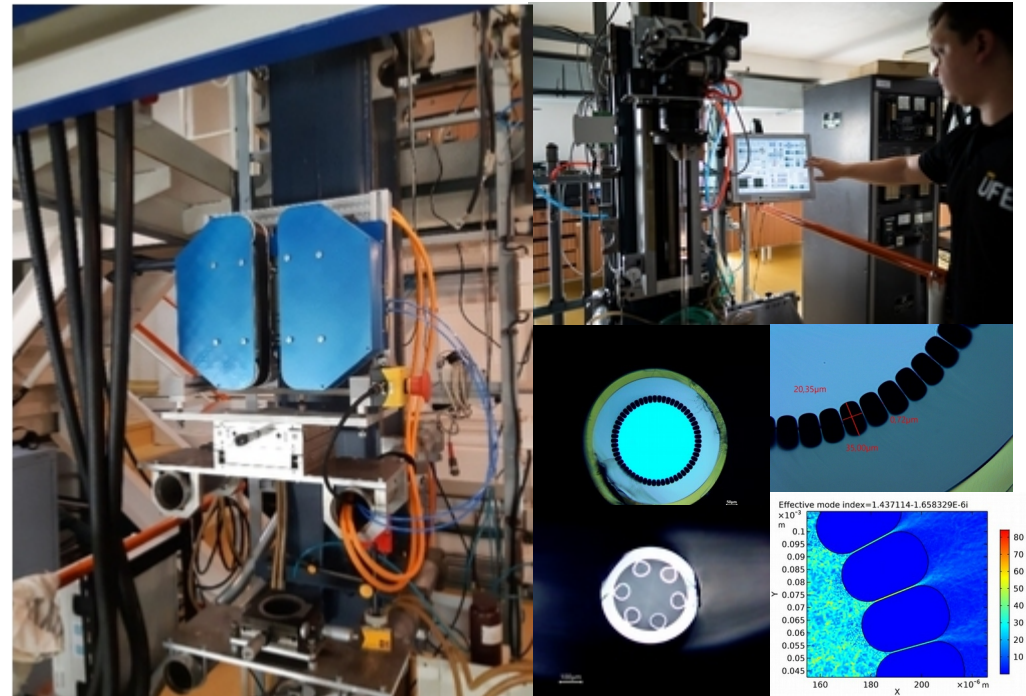
MCVD – preform fabrication

- Refurbished 2015



Fiber drawing – 2 drawing towers

- Capillary drawing system 2018
- New drawing control system 2020

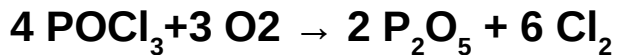
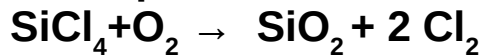


FUNDAMENTALS OF FIBRE TECHNOLOGY - PREFORMS

MCVD – Modified chemical vapor deposition
Silica tube = reactor

Ultrahigh purity precursors SiCl_4 , GeCl_4 ,
Impurities concentration: ppb, i.e. 10^{-6} mol%
(4 orders of magnitude better than melting)

Temperature gradient, T is
the highest at substrate surface
Homogeneous reaction in gas phase
at temperatures $> 1200^\circ\text{C}$ → oxides

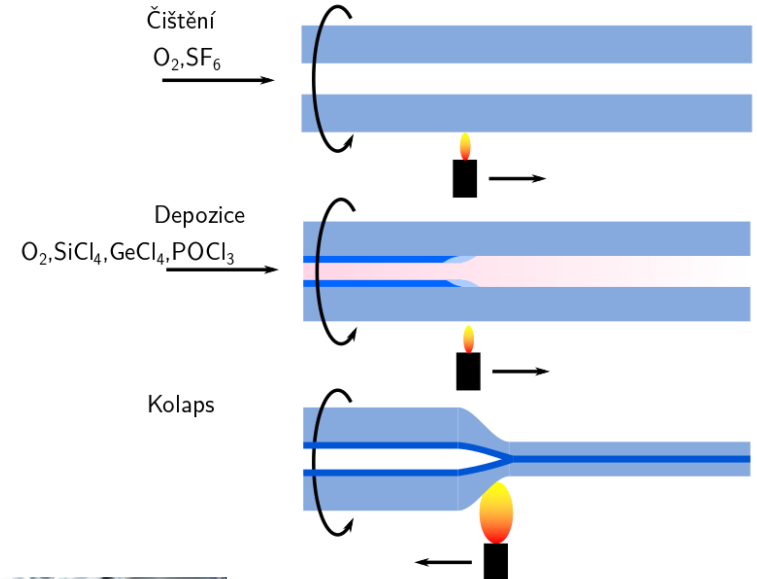


Thermophoretic particle deposition

Layer fusion at burner pass

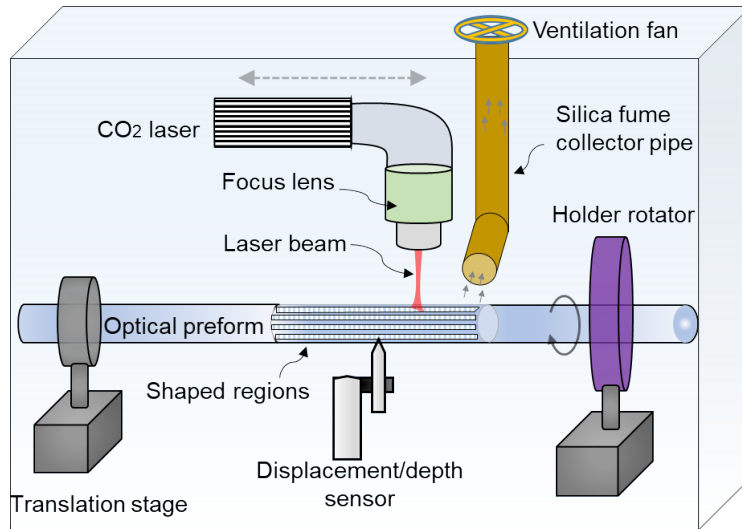
Collapse at $1800\text{--}2000^\circ\text{C}$

UFE – nanoparticle doping since 2010



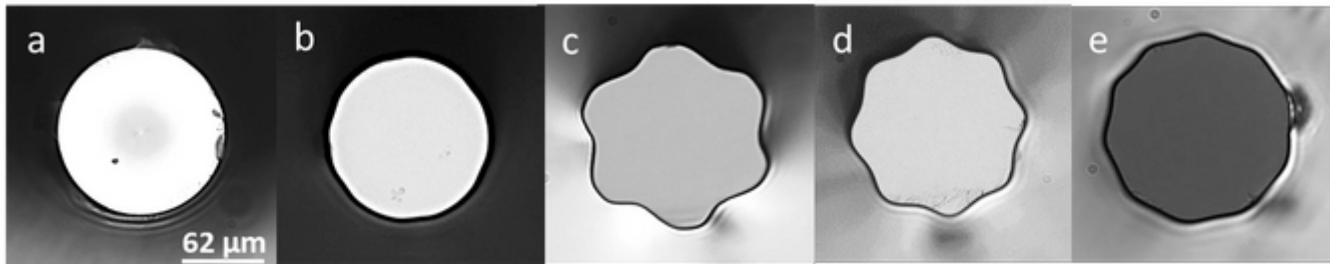
FILANO FACILITIES

CO₂ laser preform shaping (in house developed, continuous improvements)

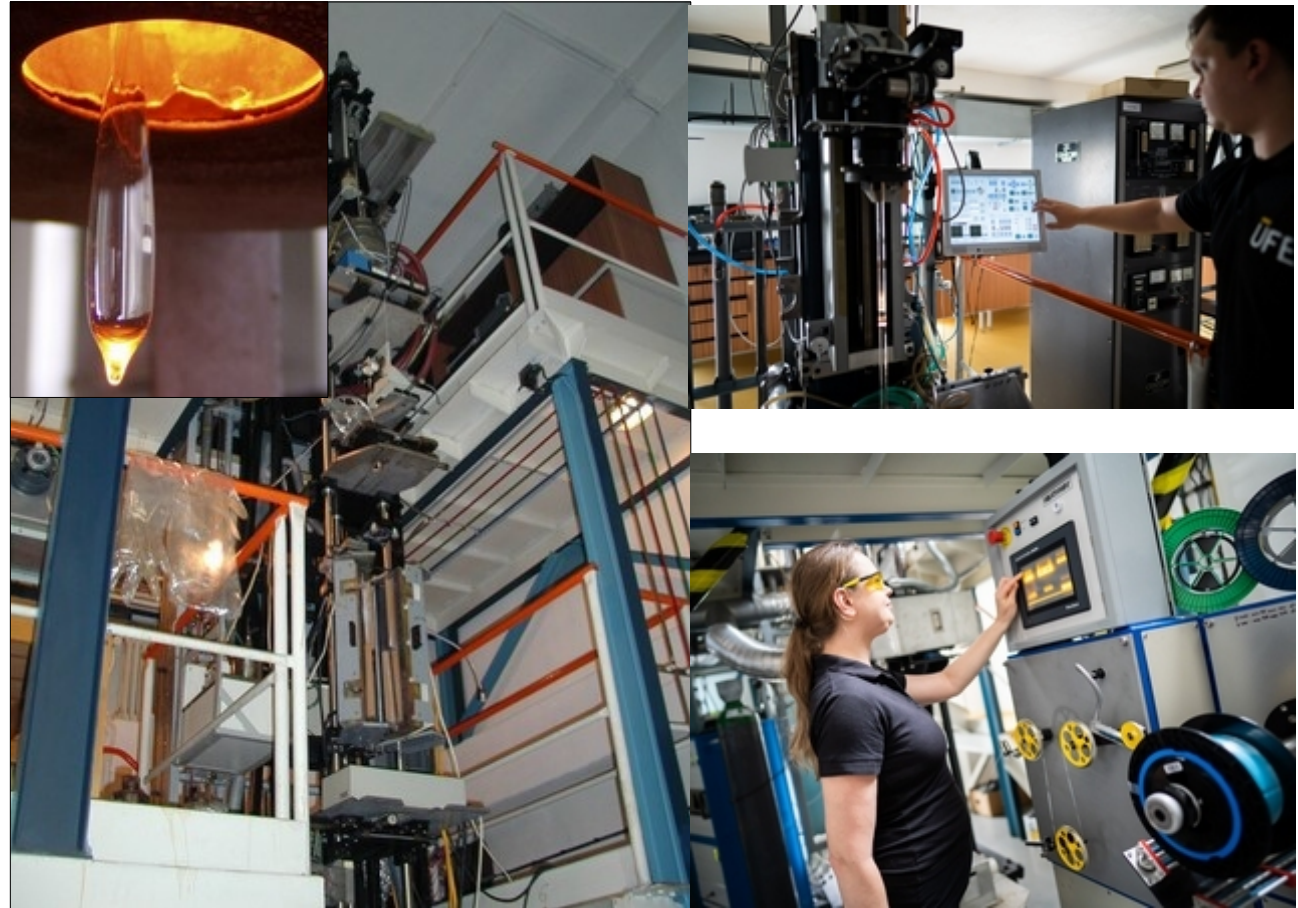
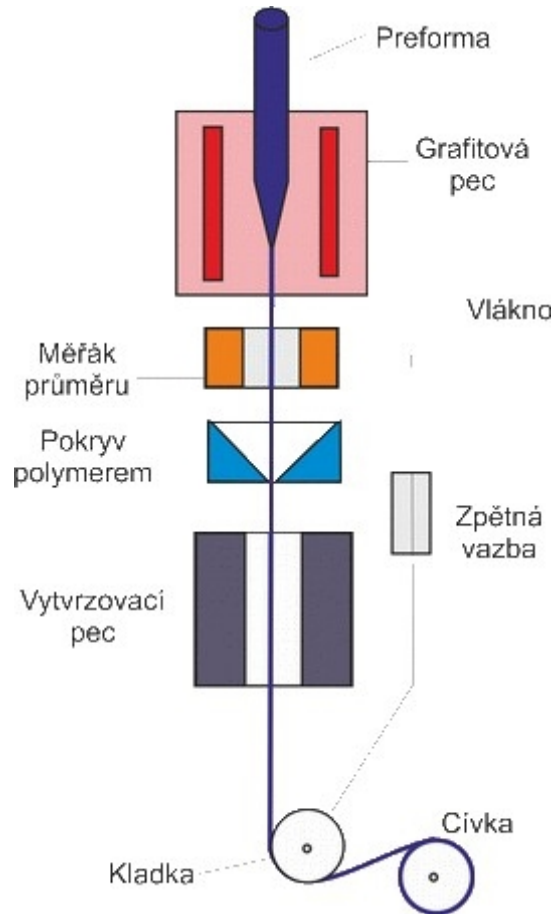


**Tvarování preforem -
směšování plášťových vidů
(mode scrambling) –
zvýšení účinnosti čerpání**

**Patent 305 888, P. Peterka
et al., 2016**

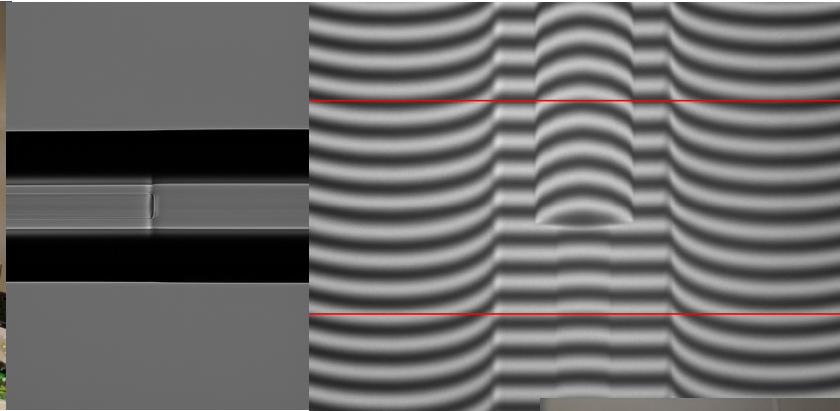
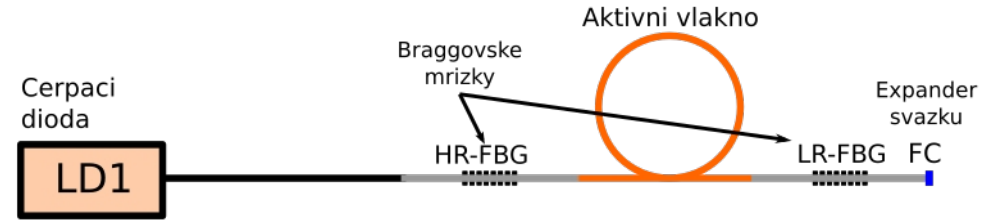


FUNDAMENTALS OF FIBRE TECHNOLOGY - DRAWING



FILANO FACILITIES

Fibre processing and splicing



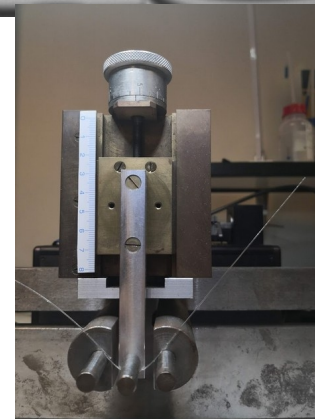
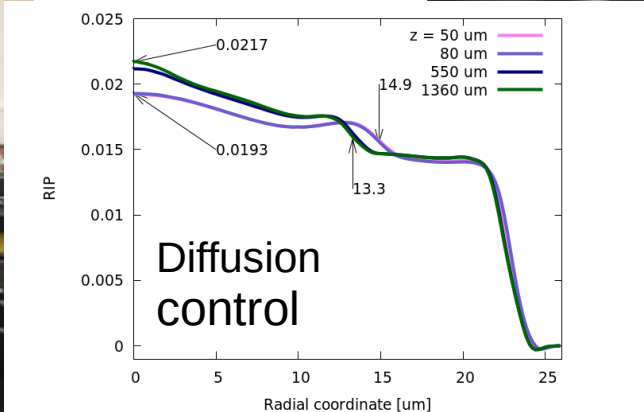
Themomechanical stripping

Cleaving PM, LD, microstructured fibres

Splicing

- 125-2000 μm fibers
- PM, standard, special

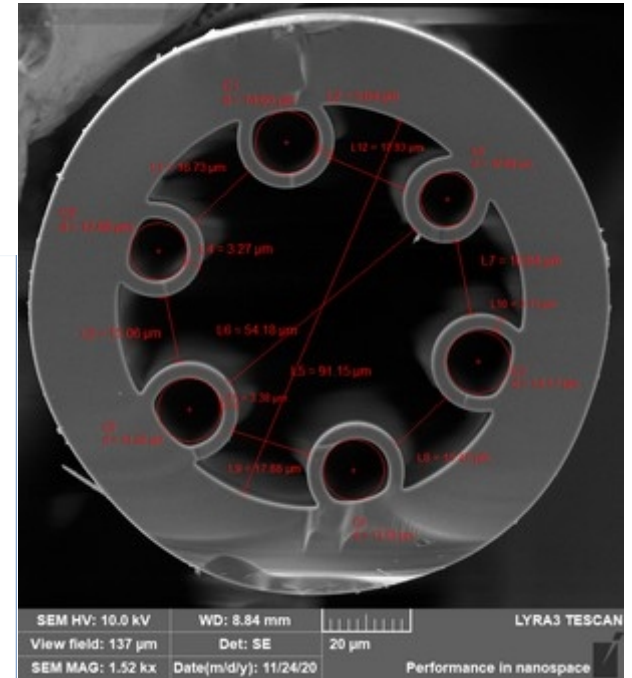
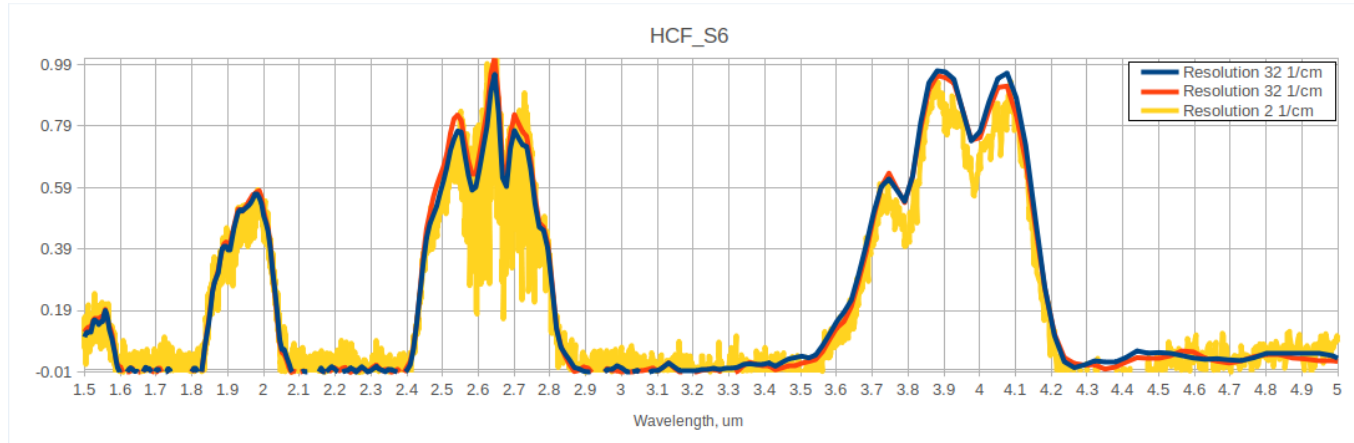
Tapering, recoating



NEGATIVE CURVATURE HOLLOW CORE FIBRES

Applications

- Extension of silica fibre spectral transmission range
- Gas fibre lasers
- Gas cells
- Delivery of giant pulses



STATE OF THE ART

Ytterbiové vláknové lasery

Ytterbium-doped fibre lasers: 1070-1080 nm
diffraction limited BPP = $\lambda / \pi = 0.341 \text{ mm mrad}$

BPP = Beam parameter product =
poloviční úhel divergence x poloměr
laserového svazku v ohnisku

Commercial lasers:

- **IPG Photonics – US: YLS-10000-SM 10 kW, BPP=0.34 mm·mrad ($M^2=1$), WPE=32%**
- **nlight – US: AFX-1000, 1.2 kW, BPP<0.5 mm·mrad ($M^2<1.5$)**
- **Trumpf – D: TruFiber 2000, 2 kW, BPP=0.38 mm·mrad ($M^2=1.1$)**
- **Fujikura – JAP: FLC-1000S-W, 1 kW, BPP<0.477 mm·mrad ($M^2<1.4$)**
- **Raycus – PRC: RFL-C1000, 1 kW, BPP<0.5 mm·mrad ($M^2<1.5$)**



Ytterbiové vláknové lasery

Ytterbium-doped fibre lasers: 1070-1080 nm

diffraction limited BPP = $\lambda / \pi = 0.341$ mm mrad

Commercial lasers:

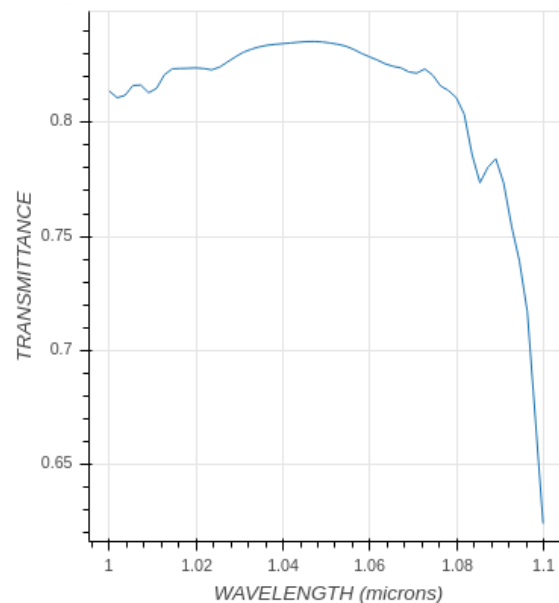
- **IPG Photonics - US: YLS-10000-SM 10 kW, BPP=0.34 mm·mrad ($M^2=1$), WPE=32%**
- **nlight - US: AFX-1000, 1.2 kW, BPP<0.5 mm·mrad ($M^2<1.5$)**
- **Trumpf - D: TruFiber 2000, 2 kW, BPP=0.38 mm·mrad ($M^2=1.1$)**
- **Fujikura - JAP: FLC-1000S-W, 1 kW, BPP<0.477 mm·mrad ($M^2<1.4$)**
- **Raycus - PRC: RFL-C1000, 1 kW, BPP<0.5 mm·mrad ($M^2<1.5$)**



Advantages

- Mature
- Efficient
- Less atmospheric absorption

E → A, h=5km, Elev 45°, summer, visibility 23 km



Disadvantages

- Atmospheric scattering
- Collateral damage
- Eye sensitivity to scattered light

Thuliové vláknové lasery

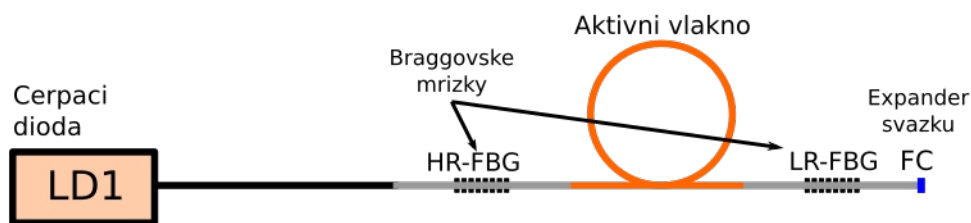
Thulium-doped fibre lasers: 1950-2050 nm

Diffraction limited BPP = $\lambda / \pi = 0.648 \text{ mm}\cdot\text{mrad}$

Best published results

QPeak (U.S.) 2011: 1 kW, 2045 nm, SE=53.2%, M^2 N/A

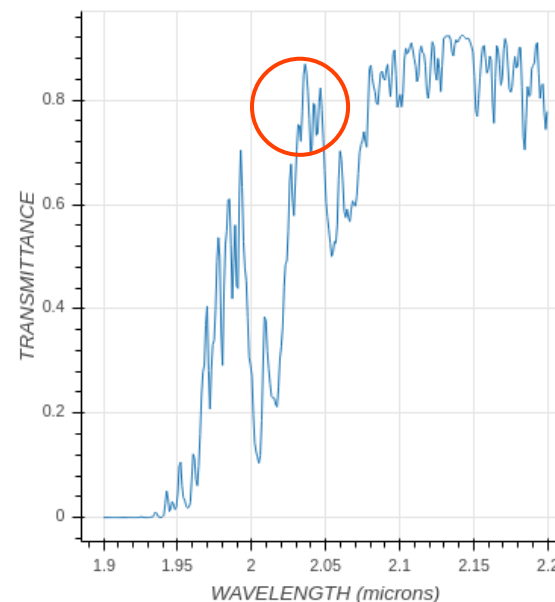
IAP Jena (D) 2018: 0.57 kW, 1970 nm, SE=49%, M^2 =2.6



Advantages

- Less atmospheric scattering ($RS \propto \lambda^{-4}$, MS?)
- Lower collateral damage

E → A, h=5km, Elev 45°, summer, visibility 23 km



Disadvantages

- CO₂, water absorption ⇒ thermal blowing
- Less efficient
- Less mature

Holmiové vláknové lasery

Holmium-doped fibre lasers: 2130-2140 nm

Diffraction limited BPP = $\lambda / \pi = 0.648 \text{ mm}\cdot\text{mrad}$

Best published results

DSTO 2013, 407 W, 2120 nm, SE 38 %, M^2 N/A

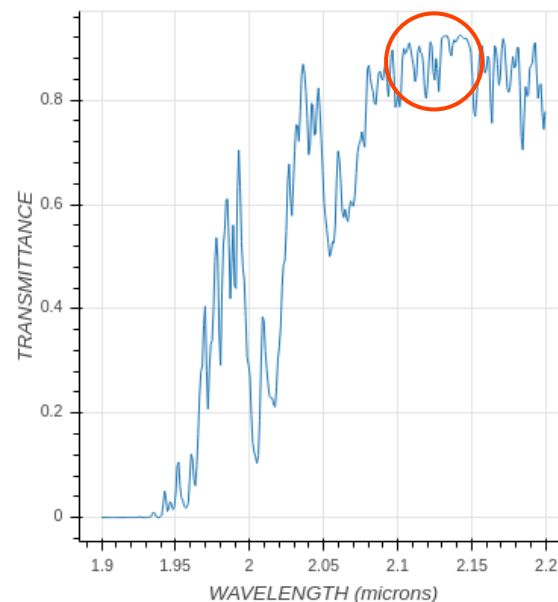
DSTO 2013, 140 W, 2128 nm, SE 57 %, M^2 N/A

Onera, 90 W, 2120 nm, SE 49 %, M^2 N/A

Quantum defect (signal 2140 nm, pump 1940 nm): 0.9

Small power regime SE: > 83% UFE, high power regime 48% UFE

E → A, h=5km, Elev 45°, summer, visibility 23 km



Advantages

- Less atmospheric scattering
- Less absorption
- Lower collateral damage

Disadvantages

- Less mature
- So far SE > 80% at low powers, <60% at high powers

Jaký výkon potřebuje armáda



USS Ponce 2014, 30 kW (6x5kW YDFL) -

Operational demonstrations show that a power of 150 kW is needed

2022 - Helios 60 kW LDEW was deployed by Lockheed Martin to be build into Arleigh Burke-class destroyer

Jak získat 150 kW? Jeden laser 1 kW (thuliový), 10 kW (ytterbiový)!

Kombinování svazků

Konverzní účinnost ytterbiových laserů 0.8

Celková účinnost ytterbiových laserů 0.32

Čerpání 150kW/0.8~190 kW čerpání, cca 6250 čerpacích 30 W diod, 6-10 M€

Napájecí zdroj: 150kW/0.32~0.5MW po dobu cca 1 min

battery energy storage system (BESS) containers

500kW - 2MW



Possibly no beam combining
Rheinmetal 10 kW



Boeing CLWS 5 kW



Sikorski CH-54 Tarhe s baterkou :-)



Energie potřebná ke zničení cíle v nultém přiblížení

Předpoklad: **zničení = vaporizace (odpaření)**

Teplo potřebné ke změně teploty o ΔT beze změny skupenství: $Q = mc\Delta T$

Teplo potřebné ke změně skupenství: $Q = mL$

Příklad: 1 kg kostka ledu o teplotě -10°C . $c = 4.2 \text{ kJ/kg}$, $L_f = 334 \text{ kJ/kg}$, $L_g = 2440 \text{ kJ/kg}$

$Q(1\text{kg}) = 42 \text{ kJ} + 334 \text{ kJ} + 420 \text{ kJ} + 2440 \text{ kJ} = 3236 \text{ kJ}$ (75% tepla na odpaření)

$Q(1\text{g} = \text{cm}^3 \text{ vody}) = 3.2 \text{ kJ}$

Hustota materiálů 2-20 g/cm³. Pro odpaření 1 cm³ čehokoliv $\sim 10 \text{ kJ}$

Sofistikovaněji

- Odraz
- Vedení tepla
- Radiace

Obecné kritérium poškození (nulté přiblížení): 10 kJ/cm^2 . Poškození během časů řádu sec $\rightarrow I = 10 \text{ kW/cm}^2$.

Mají smysl krátké (pikosekundové) pulzy? Ne – filamentace svazku, ionizační potenciál vzduchu - rozhodující je celková energie. Hrubá síla CW laseru.

Může být nižší na “slabých místech” (palivová nádrž vozidla, motor rakety).

Šíření laserových svazků

Rayleigh range - Rayleighova vzdálenost z_R ; poloměr svazku $w(z)$

$$z_R = \frac{\pi w_0^2}{\lambda}, w(z) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_R}\right)^2}$$

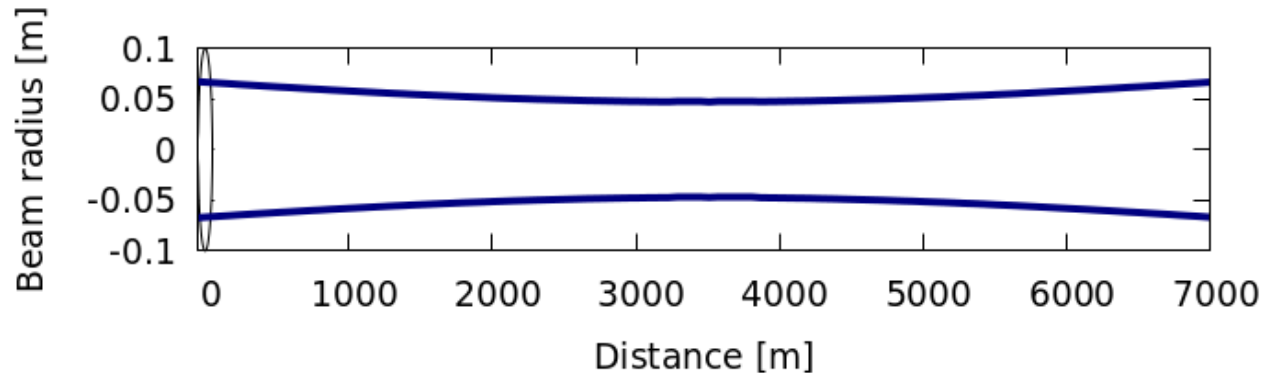
Předpokládejme cíl v Rayleighově vzdálenosti a oříznutí svazku v objektivu o průměru D na úrovni 10^{-2} , tj.

$$D = 3w(-z_R)$$

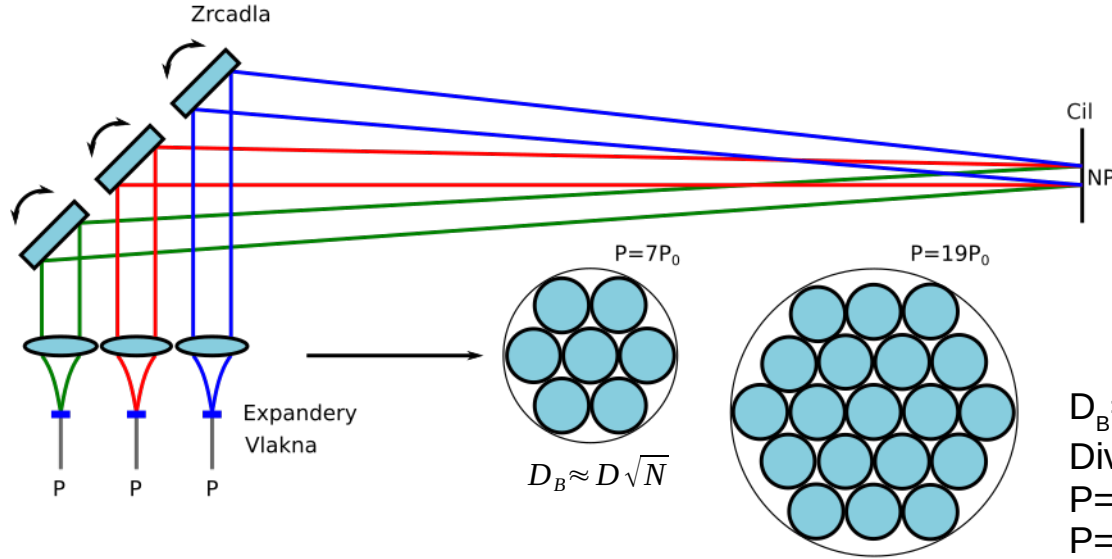
Pro objektiv o průměru $D=20$ cm dostaneme spot v ohnisku o poloměru $w_0=4.7$ cm. Plocha = 70 cm^2 , 86.5% výkonu. Nulté přiblížení: Na odpaření čehokoliv je zapotřebí cca $P=81$ kW.

$$w_0 = \frac{D}{3\sqrt{2}}$$

λ [um]	1	2
z_R [km]	7 km	3.5 km



Nekoherentní kombinování svazků



$$D_B = 5 \times 20 \text{ cm} = 1 \text{ m}$$

Divergence odpovídá D

$P = 19 \times 10 \text{ kW} = 190 \text{ kW}$ pro ytterbiový laser

$P = 19 \times 8 \text{ kW} = 152 \text{ kW}$

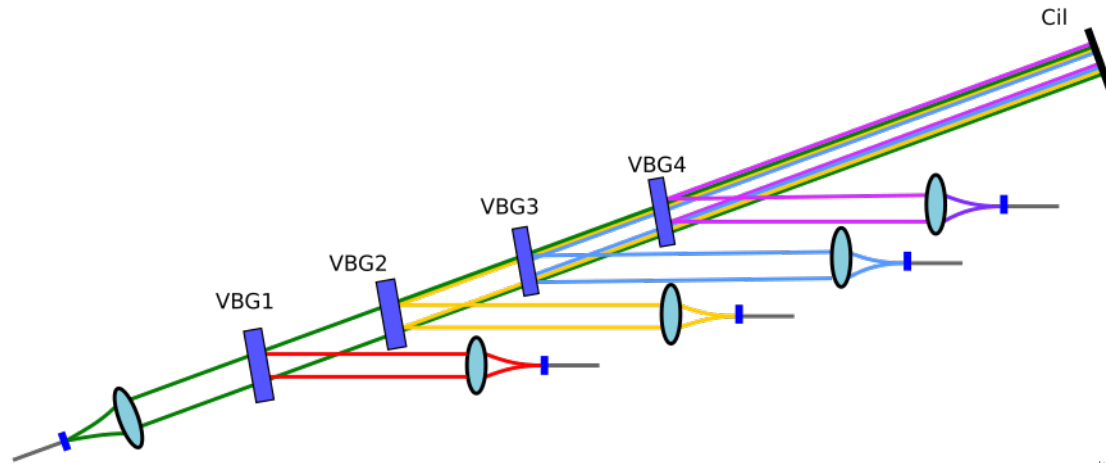
Pro thuliový laser zapotřebí 150-300 svazků

$D_B \sim 260 - 350 \text{ cm}$

P. Sprangle et al., High-Power Fiber Lasers for Directed-Energy Applications, NRL 2008

Spektrální kombinování svazků

O. Andrushyak et al., Fiber laser system with kW-level spectrally-combined output, SSDLTR 2008



- ! Velikost optických prvků
- Ibsen transmission grating – 40x15 mm
- Optigrate VBG 50x50 mm
- MDDM (patent ÚFE) – fotolitograficky 20x20 cm ?
- ! Práh poškození: 150 kW/300 cm² v polních podmínkách

$D_B = D = 20$ cm

$\Delta\lambda = 0.5$ nm, $\lambda \in (1075, 1085)$ nm

$P = 19 \times 10$ kW = 190 kW pro ytterbiový laser

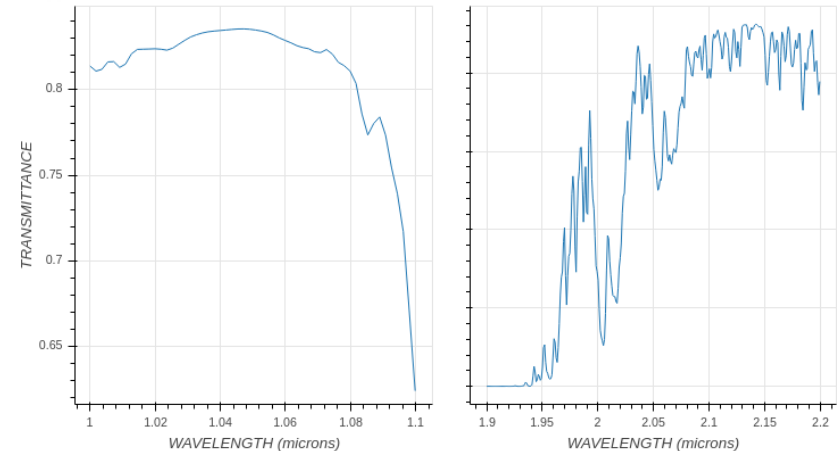
$P = 19 \times 8$ kW = 152 kW

Pro thuliový laser zapotřebí 150-300 svazků

$\Delta\lambda = 0.5$ nm, $\lambda \in (1950, 2050)$ nm

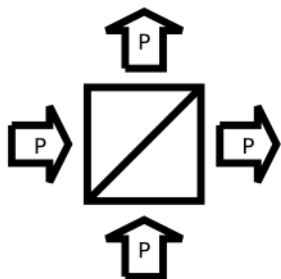
Chybí atmosférické transmisní okno

Spektrální kombinování thuliových laserů není účelné

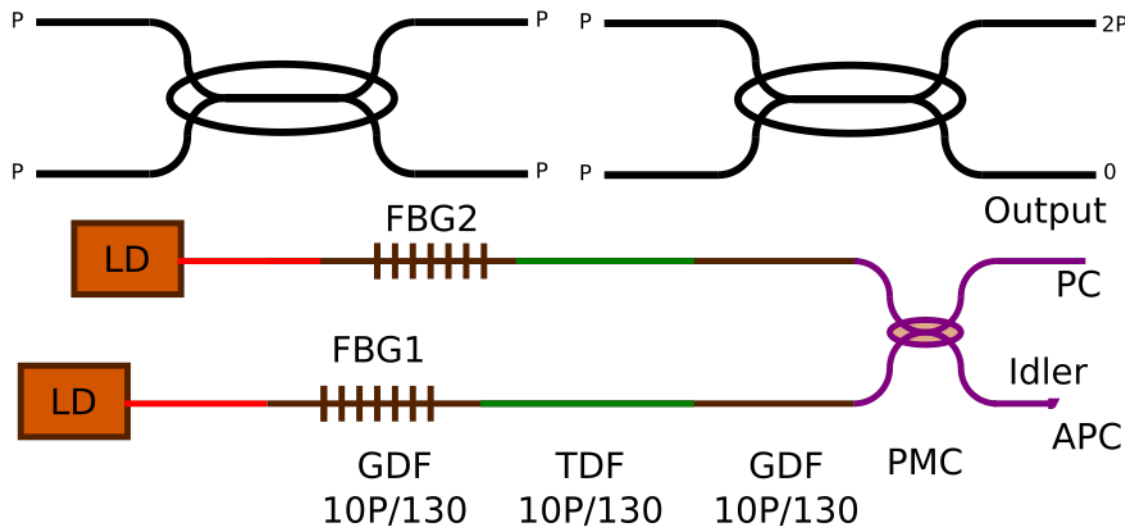
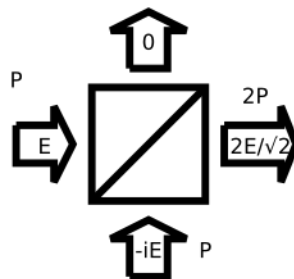


Koherentní kombinování svazků se společnou aperturou

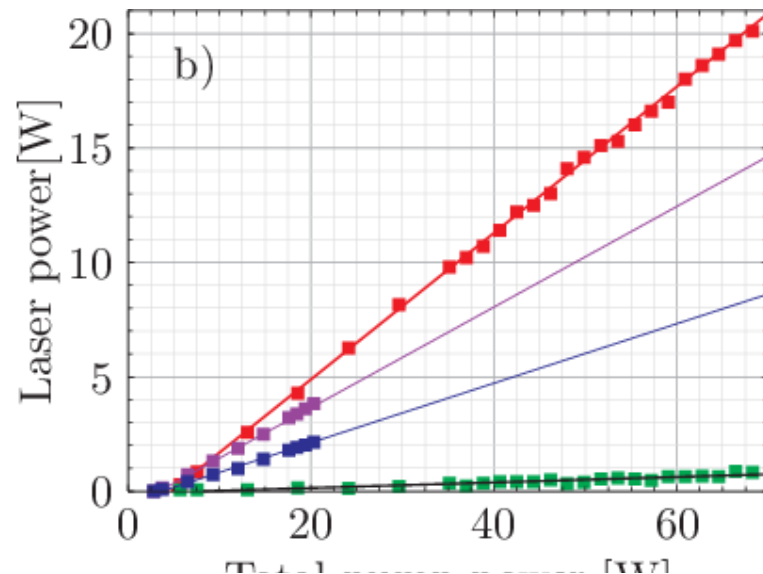
Nekoherentní kombinování svazků



Koherentní kombinování svazků



Konstruktivní interference
v blízkém poli



IOP PUBLISHING

Laser Phys. Lett. 10 (2013) 095104 (5pp)

LASER PHYSICS LETTERS

doi:10.1088/1612-2011/10/9/095104

LETTER

Coherently combined power of 20 W at 2000 nm from a pair of thulium-doped fiber lasers

P Honzatko¹, Y Baravets¹, F Todorov¹, P Peterka¹ and M Becker²

¹ Institute of Photonics and Electronics, Academy of Sciences of the Czech Republic, v.v.i., Chaberska 57, 182 51 Prague, Czech Republic

² Institute of Photonic Technology, Albert Einstein Straße 9, D-07745 Jena, Germany

E-mail: honzatko@ufe.cz

Koherentní kombinování svazků se skládanou aperturou

Konstruktivní interference
ve vzdáleném poli

$$D_B = 5 \times 20 \text{ cm} = 1 \text{ m}$$

Divergence odpovídá D_B

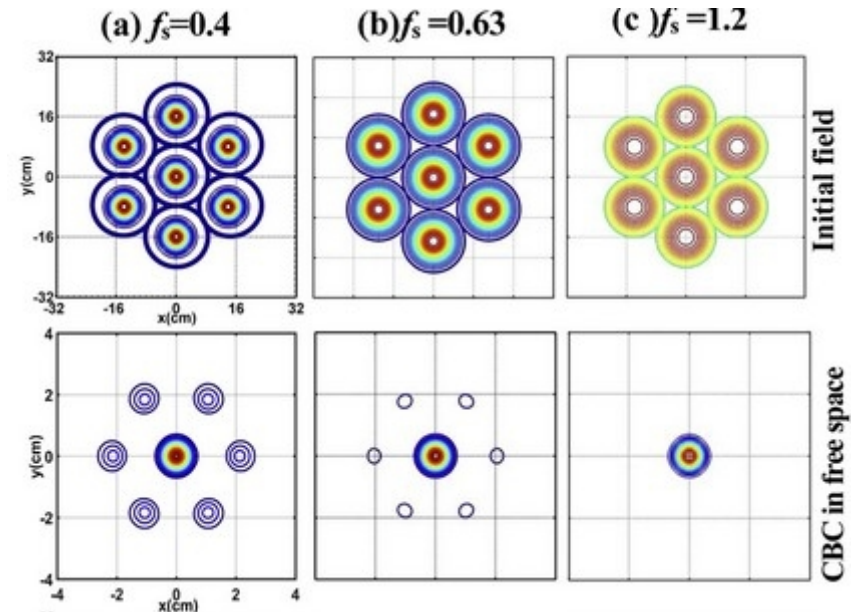
Rayleighova vzdálenost

$$w_{0C} = \frac{D_B}{3\sqrt{2}} = \frac{\sqrt{N} D}{3\sqrt{2}}, \quad z_{RC} = \frac{\pi w_{0C}^2}{\lambda} = N z_R, \quad I = \frac{P_C}{\pi w_{0C}^2} = \frac{P}{w_0^2}$$

Je-li cíl blíže, než je maximální
Rayleighova vzdálenost
objektivu, lze svazek
sfokusovat na menší spot.

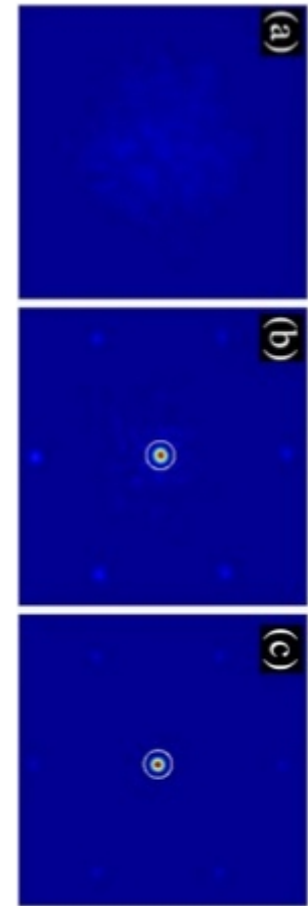
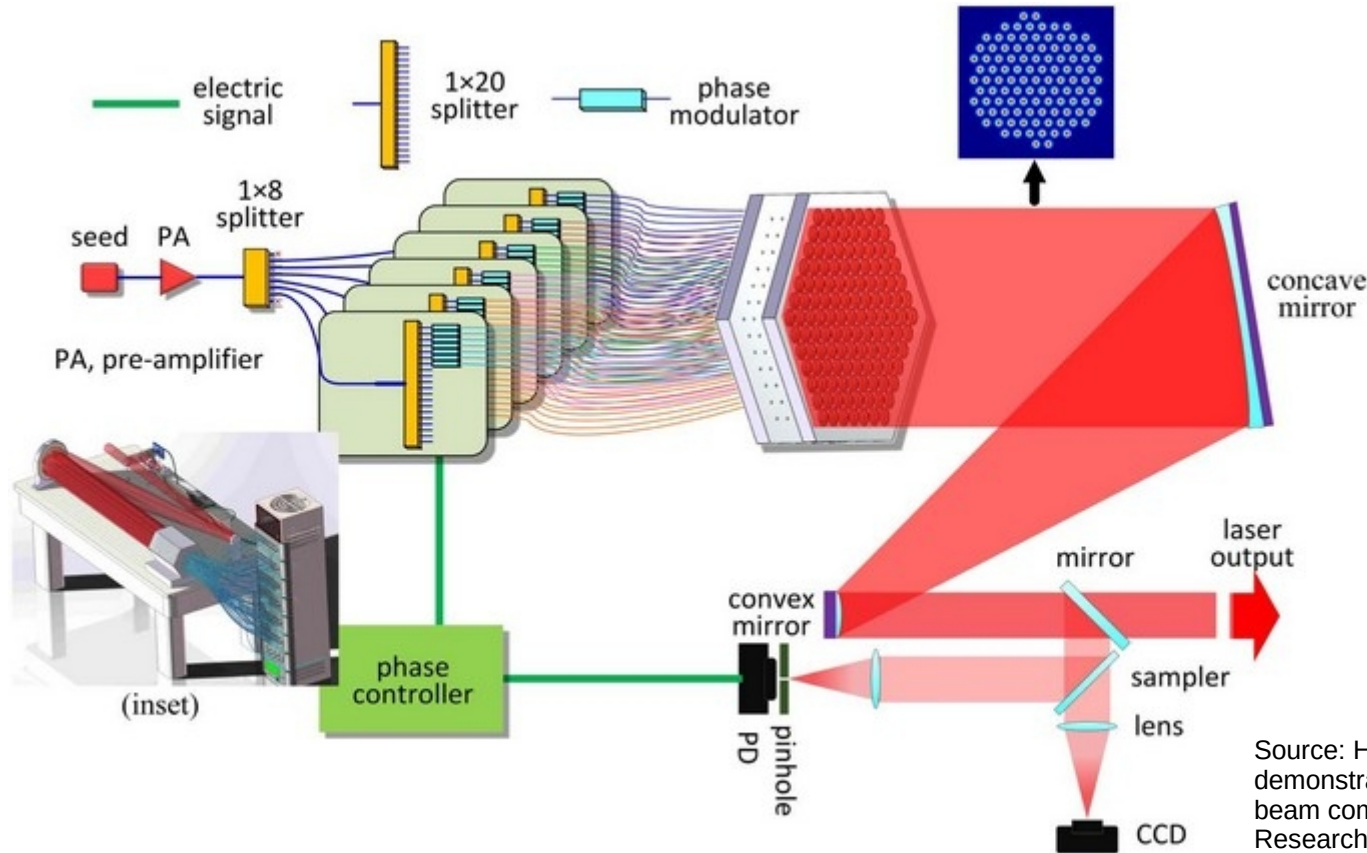
Rostoucí koeficient plnění
apertury – klesající velikost
satelitních píků – více výkonu
v hlavním spotu

Xiaoqing Li et al., Influence of fill factors on the thermal blooming of
array laser beams in the air, Optik - International Journal for Light and
Electron Optics 182 (2019) 314–323.



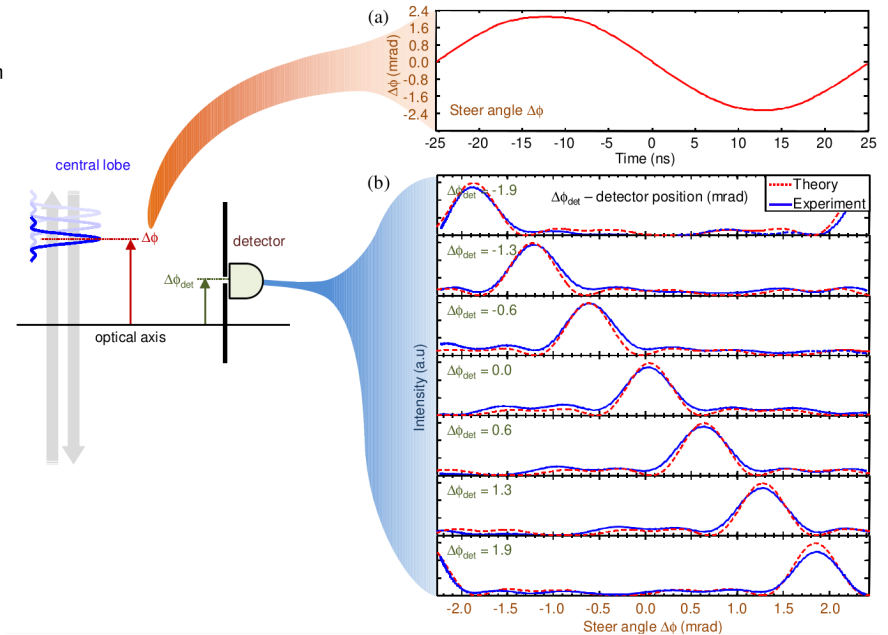
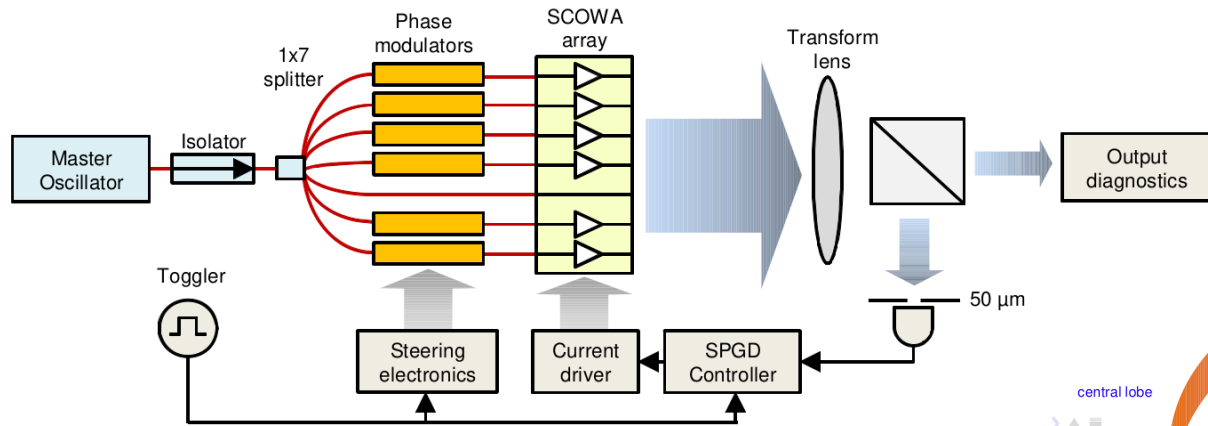
Koherentní kombinování svazků se skládanou aperturou

Konstruktivní interference ve vzdáleném poli



Source: Hongxiang Chang et al., "First experimental demonstration of coherent beam combining of more than 100 beams", Photonics Research 1943 2020

Koherentní kombinování svazků se skládanou aperturou – elektronické skenování



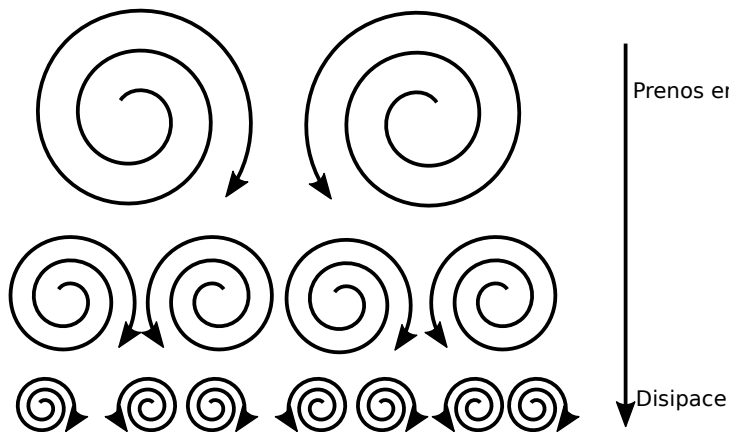
Source: W.R. Huang et al., High speed, high power one-dimensional beam steering from a 6-element optical phased array, Optics Express 17311, 2012

Vliv atmosféry

Thermal blowing: absorpce energie svazku → zahřátí plynu → změna indexu lomu

Turbulence → změny hustoty → změny indexu lomu

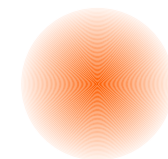
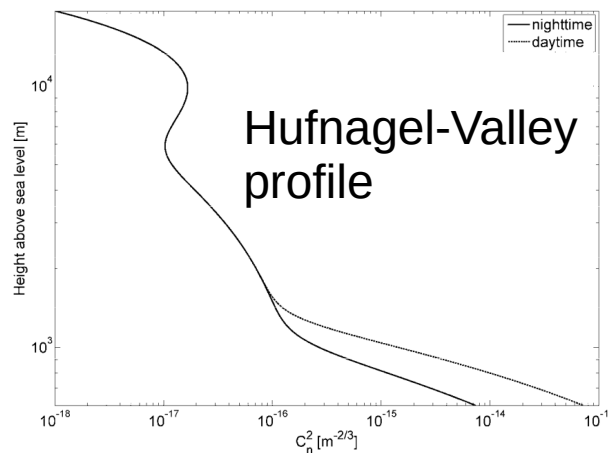
Kolmogorov – vírové kaskády



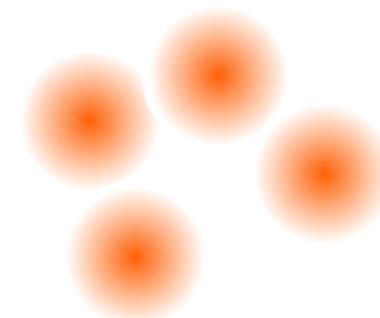
$$\langle (v_1 - v_2)^2 \rangle = C_v^2 R^{2/3}$$

$$\langle (n_1 - n_2)^2 \rangle = C_n^2 R^{2/3}$$

$$C_n^2 = C_T \left(79 \cdot 10^6 \frac{P}{T^2} \right)$$



Důsledek



Lék: Adaptivní optika
Greenwood frequency

ZÁVĚR

LDEW mají místo ve výzbroji armády

- výstřel rychlostí světla (doba k zasažení cíle řádu 10-100 μ s)
- nízká cena výstřelu
- rychlá příprava

Thuliové a holmiové lasery (1950-2050 nm) mají menší rozptyl v atmosféře a výrazně zmenšují zónu kolatelárních škod

LDEW potřebuje vysoký výkon cca 100 – 200 kW

Ytterbiové vláknové lasery jsou zralé pro použití

Thuliové a holmiové potřebují klíčový nápad pro zvýšení energetické účinnosti a výkonu

Integrace se zbraňovými systémy se řeší (Dragonfire, Helios, TALOS)

Velký dosah (byť divergovaného svazku) – povolení výstřelu s ohledem na ledadla, družice

Nutná legislativa pro příp. nasazení

Thank you.

