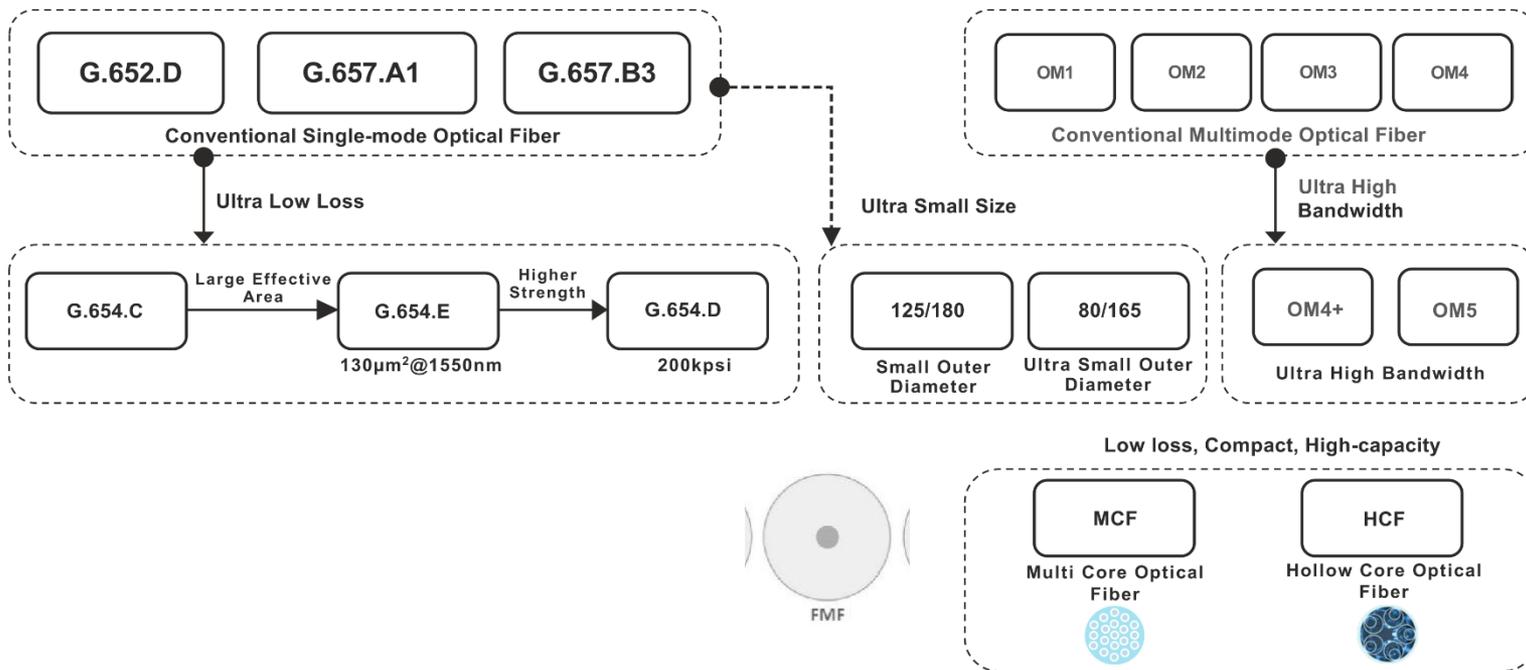


Budoucnost optických vláken

Pavel Dubský
OFA s.r.o.

Přehled typů optických vláken – stav i budoucnost



G.654.E - Vlákna s velkým efektivním průřezem a nízkým útlumem

A_{eff} – Efektivní průřez vlákna

$$A_{\text{eff}} \approx \pi \cdot (\text{MFD}_{\lambda} / 2)^2$$

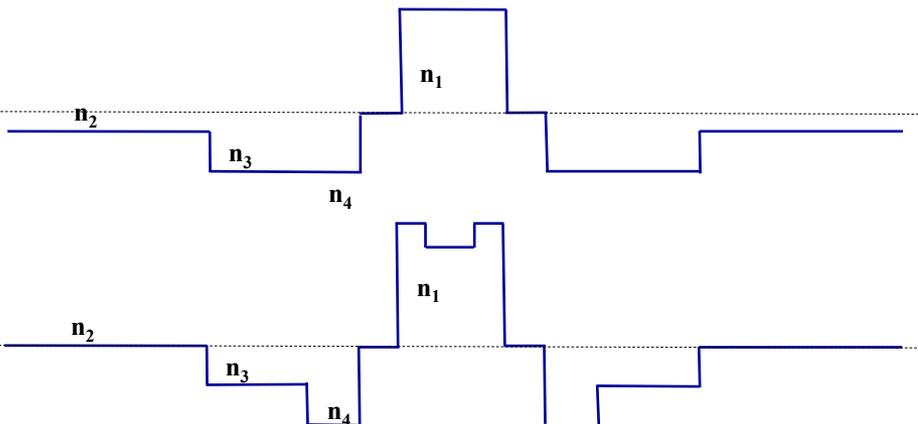
S hodnotou zhruba $110 - 170 \mu\text{m}^2 \approx$ G.652 vlákna $80 \mu\text{m}^2$

Získáme něco kolem 3 - 4 dB výkonovou výhodou

Další výkonová výhoda - útlum typicky 0,165 dB/km

Dnes již lepší citlivost na ohyby než G.652D

Význam vláken pro trasy 100+ km u 400 Gb/s koherentních systémů

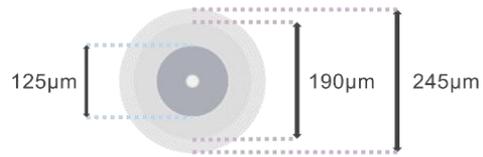
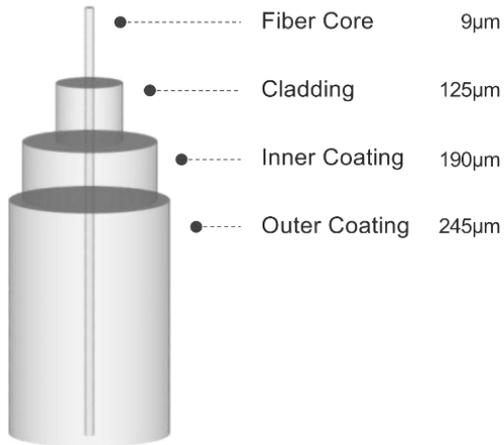


Omezení:

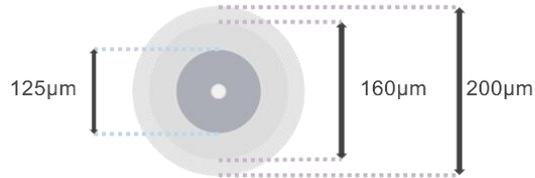
$$\lambda_{\text{cc}} = 1530 \text{ nm}$$

Vyšší chromatická disperze $> 20 \text{ ps/nm.km}$

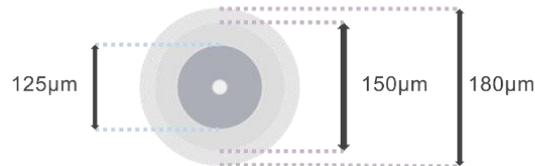
Velmi malý průměr jádra - Ultra small size



245µm Conventional Optical Fiber



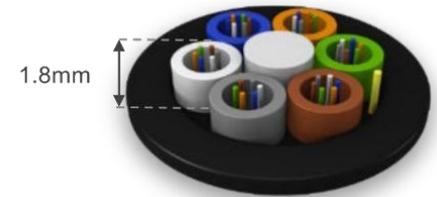
200µm Small Size Optical Fiber



180µm Small Size Optical Fiber

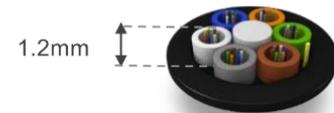


165µm Small Size Optical Fiber



Conventional Duct Cable

12-Core Loose Tube Diameter:
1.8/1.9/2.0/2.1/2.2/2.4mm



Air-blow Mini Cable

12-Core Loose Tube Diameter:
1.2mm-1.1mm-1.0mm-0.9mm

Fiber Density

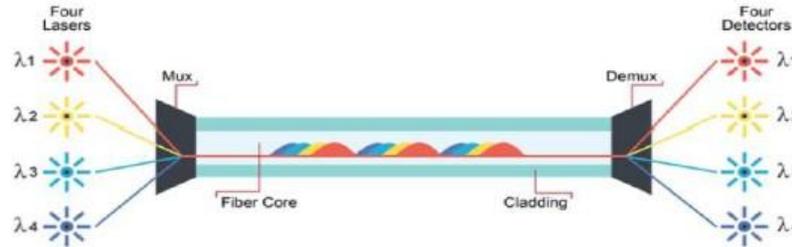


165µm Series Air Blown Mini Cable

Fibre count (No.)	Cable diameter (mm)	Fibre density (No./mm ²)	Min duct size (mm)	Cable code (No.)
96	4.1	7.3	5	8
144	4.6	8.7	5.5	6*
192	5.2	9.0	6	8*24
288	6.7	8.2	8	12*24
432	7.5	9.8	10	18*24
576	8.2	10.9	10	24*24
864	9.6	11.9	12	24*36

**Air Blown Cables Series
(96f~864f)**

Vlákna OM5

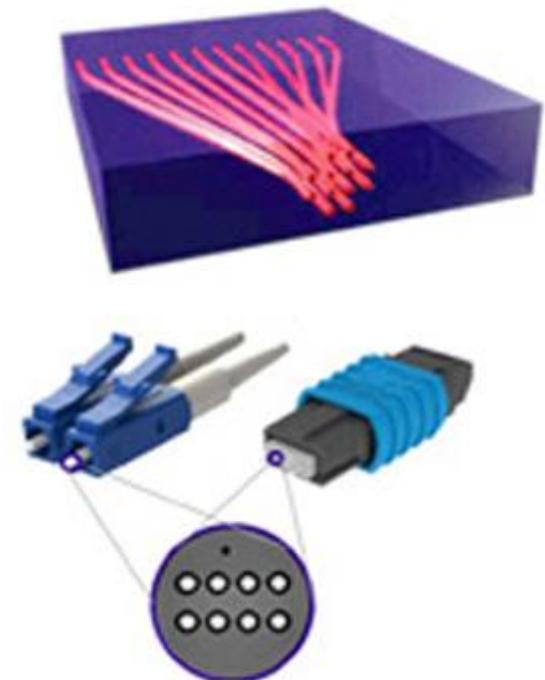
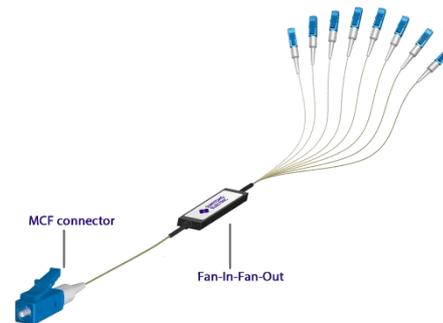
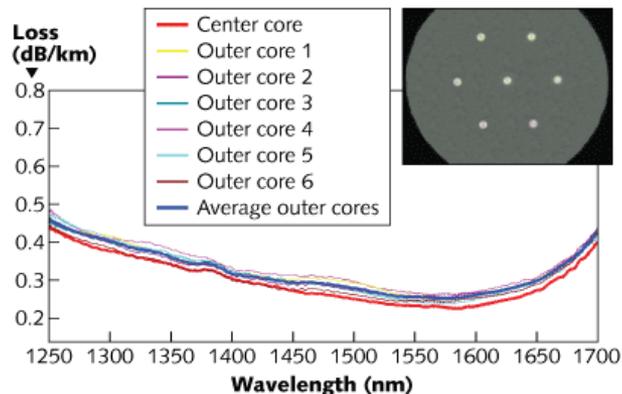


Typy MM GI vláken

Typ MM vlákna	Šířka pásma (MHz*km)	Vlnová délka (nm)	10GBe (překl. vzdál. (m))	40GBe a 100GBe (překl. vzdál. (m))	40GSWDM4 (překl. vzdál. (m))	100GSWDM4 (překl. vzdál. (m))
OM1 (62,5/125)	200/500	850/1300 (OFL)	33	N/A	N/A	N/A
OM2 (50/125)	500/500	850/1300 (OFL)	82	N/A	N/A	N/A
OM3 (50/125)	2000	850 (Laser Opt.)	300	100	240	75
OM4 (50/125)	4700	850 (Laser Opt.)	400	150	400	100
OM5 (50/125)	4700/2470	850/953 (Laser Opt.)	400	150	500	150
SWDM - 4xlambda, tedy 4xméně vláken (850, 880, 910 and 940 nm)						
OM5 - lepší možnost uprgade datových center, 4xméně vláken						

Vícejádrová vlákna (Multi-core Fibers - MCF)

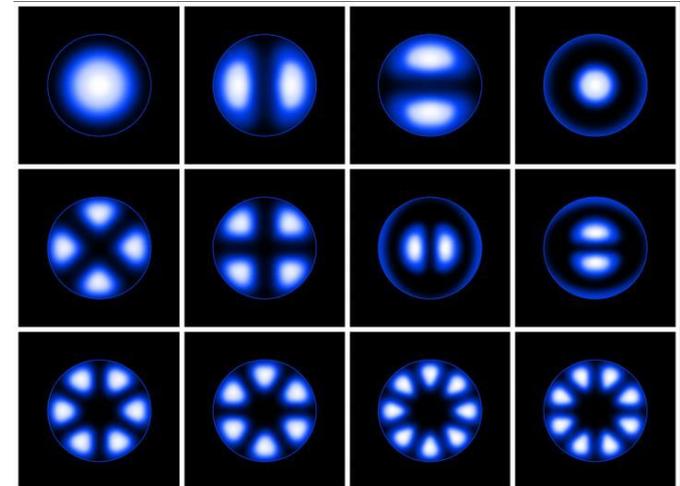
- Prostorový paradox - pouze 0,5% skla ve vláknech přenáší informaci, ve vícejádrových vláknech x-krát více
- Potenciálně vyšší přenosová kapacita těchto vláken s efektivnějším využitím prostoru a skla (prostorový multiplex v MCF)



Málovidová vlákna – Few Mode fibers

- Většinou 2, max. 3 vidy (LP01, LP11, LP21)– možnost jejich rozlišení
- Větší průměr jádra – větší navázané výkony
- Možnost využití MDM (Mode Division Multiplexing)
- Striktně kontrolované geometrické parametry – malé přeslechy, nízké ohybové ztráty

Optical Characteristics@1550nm		Range	Typical Value
Core Diameter (μm)		20 \pm 0.3	—
Cladding Diameter (μm)		125 \pm 0.5	—
Cladding Non-circularity (%)		< 0.7	—
Wavelength (nm)		1450-1700	—
Coating Diameter (μm)		245 \pm 10	—
Dispersion (ps/(nm·km))	LP01	\leq 23	21.2
	LP11	\leq 23	20.5
Dispersion Slope (ps/(nm ² ·km))	LP01	\leq 0.11	0.098
	LP11	\leq 0.11	0.096
Effective Area (μm^2)	LP01	\geq 100	112
	LP11	\geq 140	152
Attenuation (dB/km)	LP01	\leq 0.21	0.19
	LP11	\leq 0.21	0.2



Duté vlákno – Hollow Core Fiber

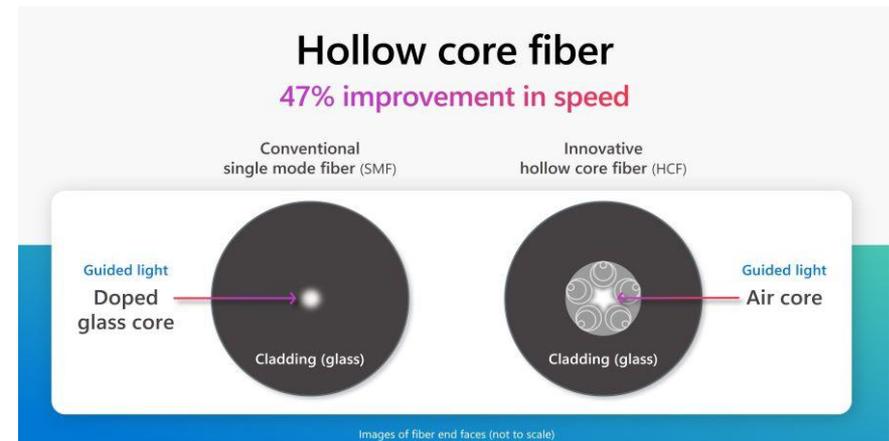
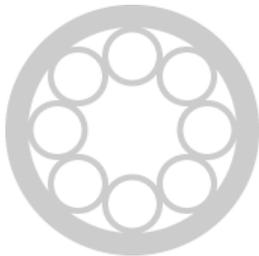
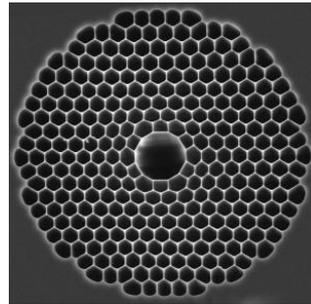
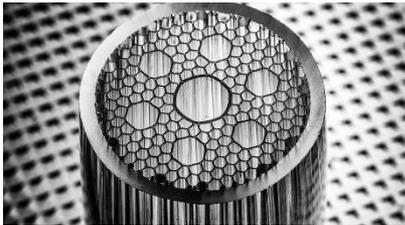
$n=1$ namísto 1,5 ve skle

Záření (světlo) se šíří o 33% rychleji než ve skle

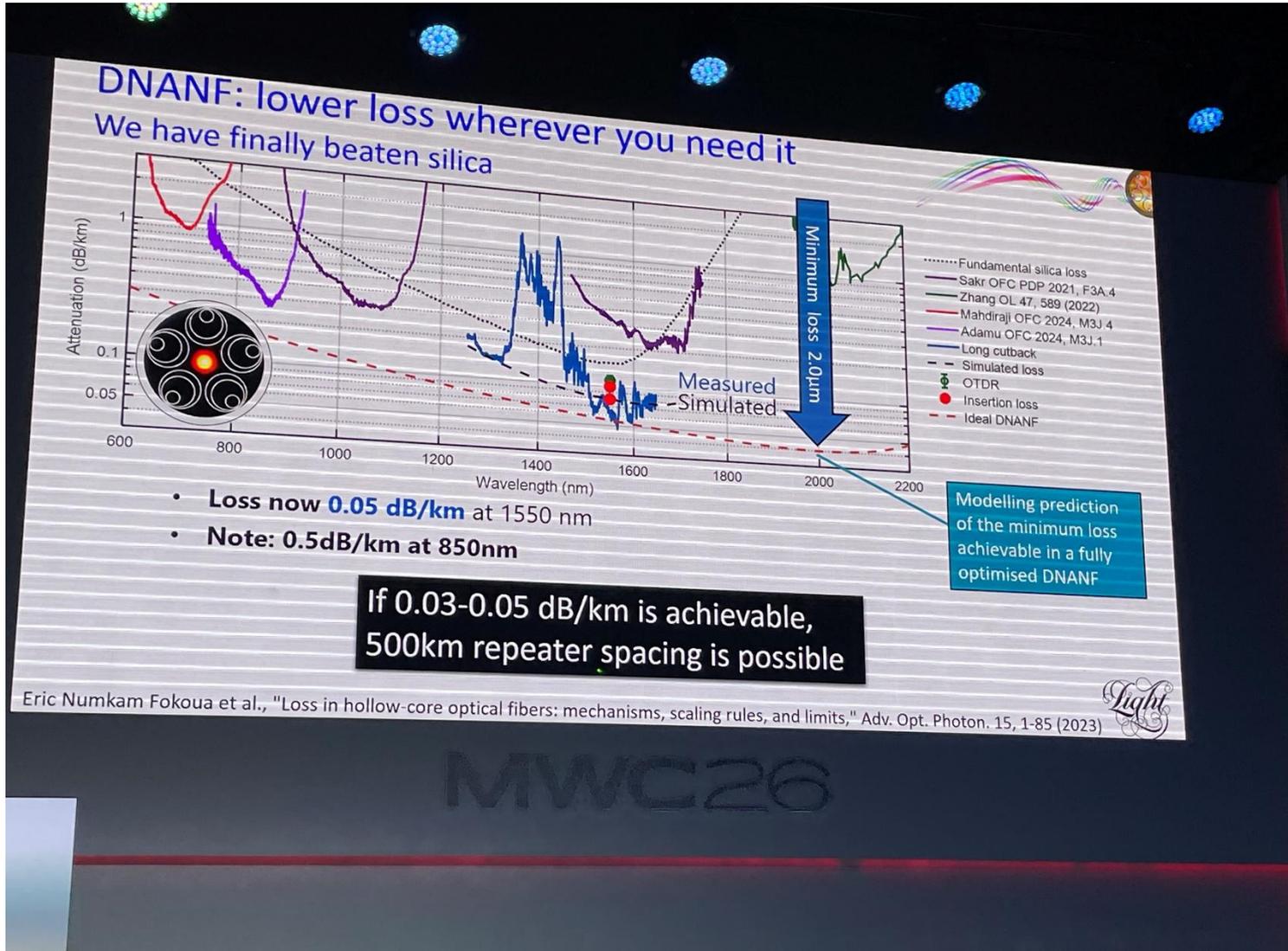
Rychlejší odezva – o cca 1,54 μs na km \longrightarrow nízká latence

Vzduch, vakuum = lineární prostředí – minimální nelinearity

Nested structure – SM režim - double nested anti-resonant
nodeless fiber (DNANF)+photonic bandgap guiding fiber (PBG)

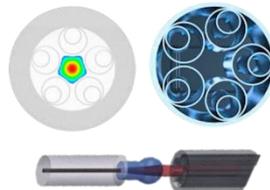
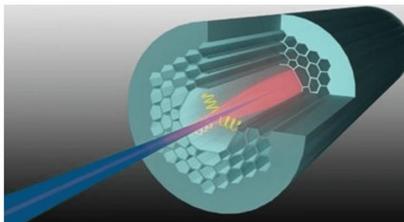


Duté vlákno – Hollow Core Fiber



Duté vlákno – Hollow Core Fiber

- Nízká chromatická disperze - <5 ps/nm.km
- Velmi nízký útlum - $<0,1$ dB/km
- Možnost navázání vysokých výkonů – jádro 10-30 μm
- Provoz dnes již od 1310 nm
- Výzvy – náklady, výrobní délka, mechanická odolnost, ohybové vlastnosti (radius cca 10 cm), útlum na spojích (0,2-3 dB), útlum odrazu (-15 dB), malý Rayleighův rozptyl (cca o 14 až 20 dB menší než SMF) a jeho variace podél vlákna, svařování, možná absorpce na znečišťujících plynech, jak zesilovat signál, stárnutí = inženýrské problémy



- **> 31%** Lower latency 
 - **≤ 0.1 dB/km** Ultra-low loss 
 - **150 ~ 500%** Higher capacity 
- Breaking the loss limit of quartz fiber 0.142 dB/km
Breaking the non-linear Shannon limit on capacity



HCFs: Nested Nodeless Structure Becomes Mainstream



Over 20 years, the attenuation of HCF has decreased from 1000dB/km to 0.05dB/km;
 Several major fiber manufacturers in China can fabricate HCF with ≤ 0.2 dB/km, providing necessary conditions for their industrialization



Southampton
 0.174 dB/km@C-band

Source: Jason G. T. et al. OFC 2022



Linfiber
 0.1dB/km@1550 nm

Source: Gao S. et al. Optics 2026, 1(24), 56-61



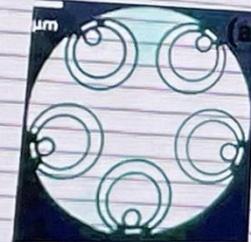
Southampton
 0.091 dB/km@1550 nm
 <0.2 dB/km@26 THz

Source: Rehman M. et al. Nature Photonics 2026, 1-8



Linfiber
 0.052 dB/km@1550 nm

Source: Gao S. et al. ECOC 2025, Tu03.01.1



YOFC
 0.05dB/km@1550 nm

Source: Ding Y. et al. ECOC 2025, Tu04.01.2



ZTT
 <0.2dB/km@1550 nm



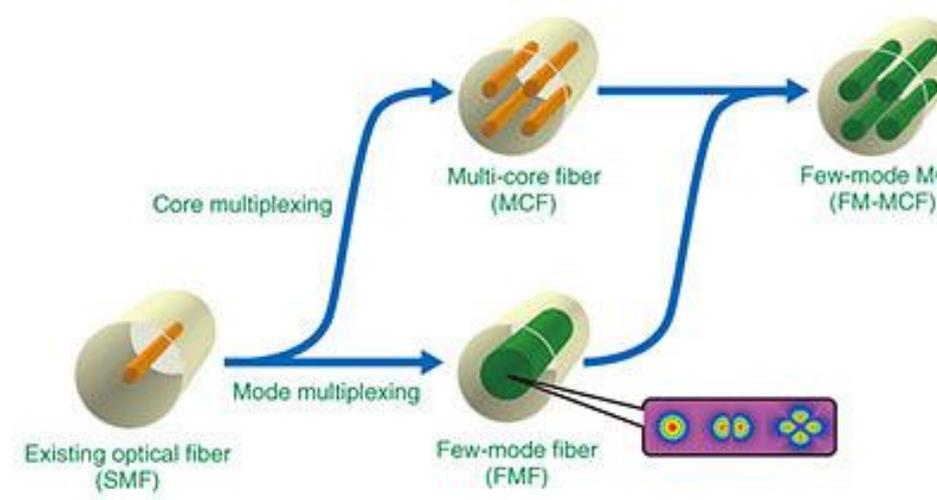
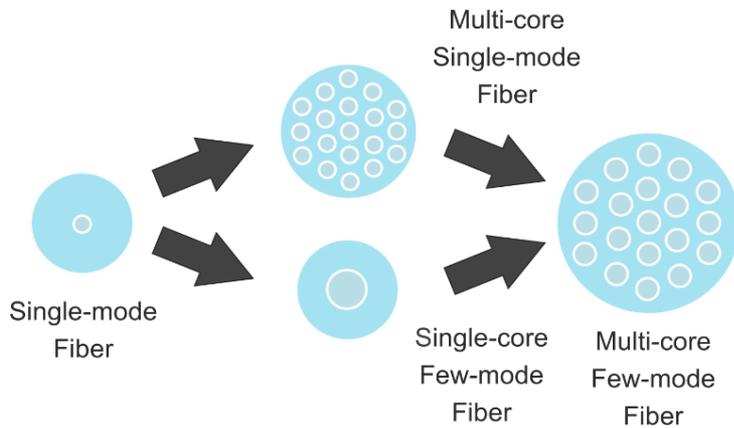
Henglong
 <0.2dB/km@1550 nm

Source: 2023 New Product Launch Event

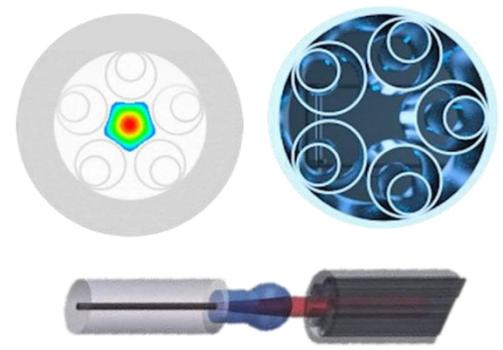


FiberHome
 <0.2dB/km@1550 nm

Závěrem - Trend pro budoucí generace optiků



+



- **> 31%** Lower latency
 - **≤ 0.1dB/km** Ultra-low loss
 - **150 ~ 500%** Higher capacity
- Breaking the loss limit of quartz fiber 0.142 dB/km
- Breaking the non-linear Shannon limit on capacity

Děkuji za pozornost