

Komponenty vláknových zesilovačů

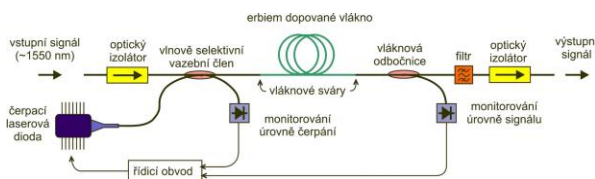
Pavel Peterka

Ústav fotoniky a elektroniky Akademie věd ČR, v.v.i.
Chaberská 57, 182 51 Praha - Kobylisy

přednáška z cyklu Vláknové lasery a zesilovače,
zimní semestr šk. roku 2020/21
Poznámky a další materiály k přednáškám najdete zde:
<http://www.ufe.cz/cs/pavel-peterka-pro-studenty>

1

Komponenty vláknových zesilovačů



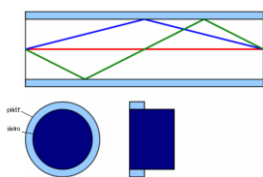
- ♦ **optická vlákna** ... *módová struktura, útlum, disperze, výroba, způsob dopování prvky vzácných zemin, měření profilu indexu lomu preforem a vláken*
- ♦ **spojování vláken** ... *konektory, sváření*
- ♦ **vazební členy a WDM**
- ♦ **izolátor, cirkulátor**
- ♦ **spektrální filtry** ... *dvoujádrová vlákna, Braggovské vláknové mřížky, LPG*
- ♦ **kompensátory disperze**
- ♦ **čerpací laserové diody**

2

Optická vlákna – základní typy

mnohamódová :

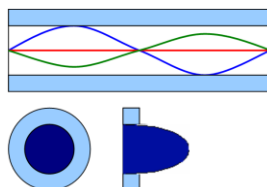
se skokovou změnou
indexu lomu



průměr pláště: 125 μm

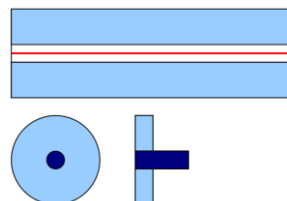
průměr jádra: typ. 105 μm

gradientní



50 nebo 62,5 μm

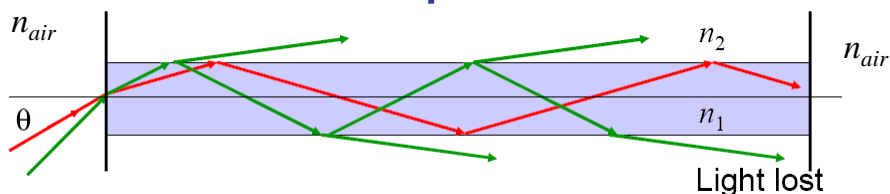
jednomódová :



10 μm

3

Numerická apertura vlákna



Paprsky světla dopadající na rozhraní pod úhlem větším než je mezní úhel ($90^\circ - \theta_{\max}$) jsou vláknem vedeny.

$$NA = \sin \theta_{\max} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

typické hodnoty NA :	0.15, 0.22 až 0.6
odpovídající úhel θ_{\max} :	8.6°, 13° až 37°

Čím větší NA , tím více světla je možné do vlákna navázat.

Jaký fyzikální význam má NA
u jednomódových vláken ?

$$\theta = \frac{\lambda}{\pi w}, \quad w \cong \frac{MFD}{2}$$

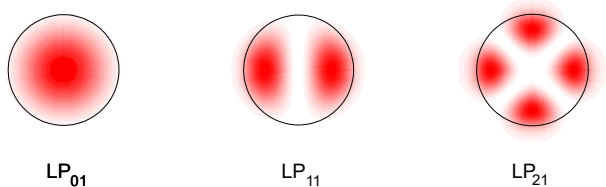
4

Optická vlákna – módy

elektromagnetické pole ve vlákně : $\mathbf{E} = \mathbf{E}(r, \varphi) e^{j(\omega t - \beta z)}$, $H_y = \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} E_x$,
 řešení Maxwellových rovnic, resp. Helmholtzovy vlnové rovnice pro dané prostředí

$$(\Delta + k_0^2 n^2) \mathbf{E} = 0,$$

konečný počet řešení (min. jedno) → módy (vidové) spektrum
 Mód je charakterizován konstantou šíření (β) a příčným rozložením pole $E(r, \varphi)$.
 Existuje ve dvou nezávislých polarizačních stavech.



5

Příčné rozložení pole LP módů

V přiblížení slabě vedoucího vlnovodu $\Delta = \frac{n_{co} - n_{cl}}{n_{cl}} \ll 1$, je podélná konstanta šíření β řešením zjednodušené charakteristické rovnice:

$$\frac{J_m(U)}{U J_{m+1}(U)} = \frac{K_m(W)}{W K_{m+1}(W)} \quad \begin{aligned} U &= au, & u^2 &= k_0^2 n_{co}^2 - \beta^2, \\ W &= aw, & w^2 &= \beta^2 - k_0^2 n_{cl}^2. \end{aligned}$$

J_m - Besselova funkce 1. druhu, m-tého řádu,
 K_m - modifikovaná Besselova funkce 2. druhu, m-tého řádu

A lze najít přibližné analytické řešení této rovnice, přibližný vztah pro konstantu šíření základního vidu: $U(V) = (1 + \sqrt{2}) V / [1 + (4 + V^4)^{1/4}]$.
 [D. Gloge, Appl. Opt. 10(10):2252, 1971]

kde V je normovaná frekvence: $V = \sqrt{U^2 + W^2} = k_0 a NA = \frac{2\pi}{\lambda_0} a \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$
 (jinak parametr V vlnovodu)

Detlef Gloge definoval tzv. lineárně polarizované módy LP_{ml} :
 m... azimutální, l... radiální index

Z podmínky spojitosti pole na rozhraní plyne: $B = \frac{A J_m(U)}{K_m(W)}$

$$\begin{aligned} r \leq a, \quad E_x &= A J_m(ur) \begin{cases} \sin(m\varphi) \\ \cos(m\varphi) \end{cases} \\ r > a, \quad E_x &= B K_m(wr) \begin{cases} \sin(m\varphi) \\ \cos(m\varphi) \end{cases} \end{aligned}$$

6

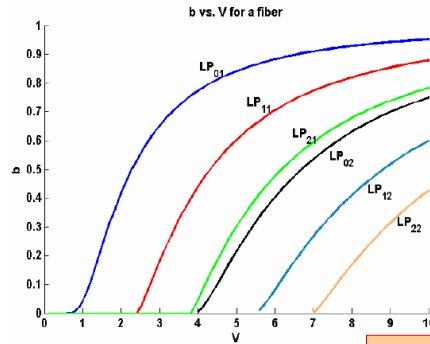
Mezní vlnová délka cut-off wavelength

$$V = 2.405 \Rightarrow \lambda_{co} = \frac{2\pi}{2.405} a NA$$

Normovaná
konstanta šíření b :

$$b = \frac{n_{eff}^2 - n_2^2}{n_1^2 - n_2^2}$$

kde $n_{eff} = \beta / k_0$



$$V = k_0 a NA$$

b závisí pouze na V

b (i n_{eff}) roste s V (vtahování pole k ose)

7

Gaussovská aproximace pole LP_{01} módu

Příčné rozložení pole LP_{01} módu je
velmi blízké Gaussově funkci

velmi užitečné pro řadu výpočtů

Gaussova aproximace:

$$E(r) = A e^{-\frac{r^2}{w^2}}$$

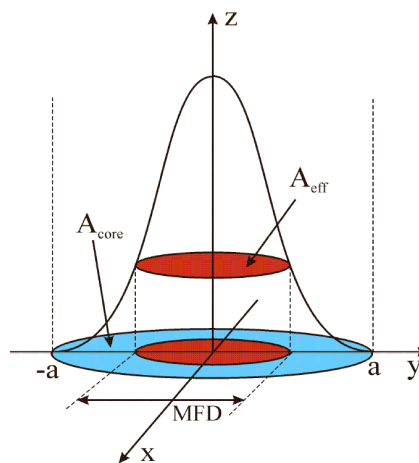
w ... stopa pole pro Gauss. aproximaci

$E(w) = 1/e$ maxima, $I(w) = 1/e^2$ maxima

$MFD = 2w$... průměr módového pole

Mode Field Diameter

A_{eff} ... efektivní plocha módu (91 % výkonu)

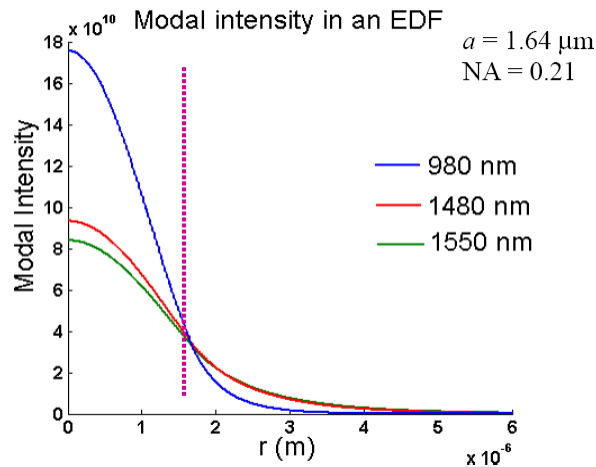


$$w = a \left(0.65 + \frac{1.619}{V^{1.5}} + \frac{2.879}{V^6} \right); \quad 0.8 < V < 2.5$$

Marcuse, Bell Syst. Tech. J. 56:703, 1977

8

Příčné rozložení pole LP módů v EDF

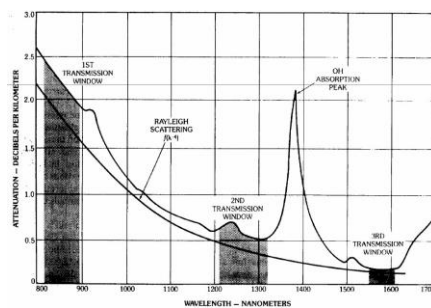


Čím větší NA a užší jádro tím je lepší vzájemný překryv pole signálu a čerpání s dopanty (pole je stáhnutější k ose vlákna)

9

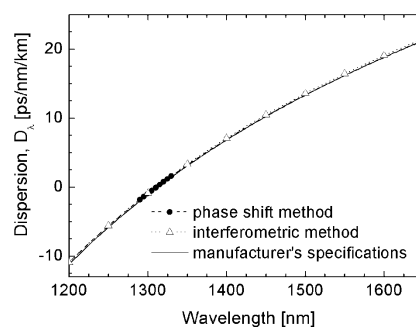
Útlum a disperze

optické ztráty



Rayleighův rozptyl
 absorpce na nečistotách
 rozptyl na nerovnostech rozhraní
 ohybové ztráty

chromatická disperze SSMF

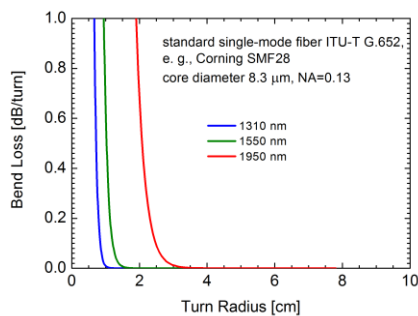


chromatická disperze:
 materiálová + vlnovodná
 vlákna s posunutou disperzí DSF, NZ-DSF
 komenzátory disperze (DCF)

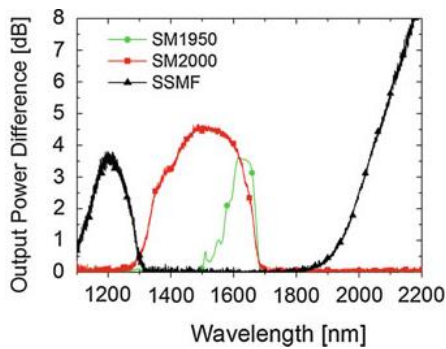
10

Ohybové ztráty

ohybové ztráty SSMF (model)



ztráty vzniklé ohybem (měřeno při jedné smyčce o průměru 4 cm)

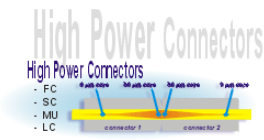
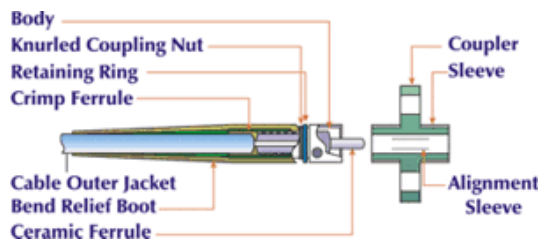


$$\alpha \text{ (dB/m)} = 4.343 \left(\frac{\pi}{4aR_c} \right)^{1/2} \left[\frac{U}{VK_1(W)} \right]^2 \frac{1}{W^{3/2}} \exp \left[-\frac{2W^3}{3k_0^2 a^3 n_1^2} R_c \right]$$

Dietrich Marcuse, "Curvature loss formula for optical fibers," J. Opt. Soc. Am. 66, 216-220 (1976).

M. Pisarik, P. Peterka, S. Zvanovec, Y. Baravets, F. Todorov, I. Kasik, and P. Honzatko, "Fused fiber components for "eye-safe" spectral region around 2 μm, Opt. Quant. Electron. 46, 603-611 (2014).

Spojování vláken konektory



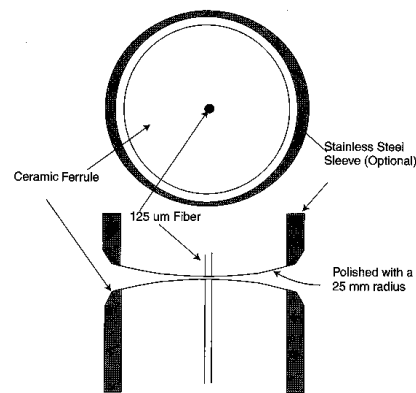
snadná manipulace

snadná manipulace + závěrka
(ochrana očí obsluhy & čelní plochy ferrule)

Hlavní rozdíl mezi konektory je rozdílný způsob upevnění standardní ferrule Ø2,5 mm.

Spojování vláken konektory

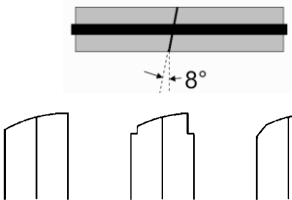
FL - flat end (3.5% odraz, ~14 dB)
PC - physical contact, podle kvality leštění
super (SPC) nebo ultra (UPC)



typ konektoru	původ	typ. vložné ztráty [dB]	typ. zpětný odraz [dB]
SMA/PC	Amphenol	≤1.0	-45
FC/FL	NTT	≤1.0	-14
FC/PC		≤0.5	≥-27
FC/SPC		≤0.5	≥-40
FC/UPC		≤0.5	≥-50
FC/APC		≤0.17	≥-67
SC/APC		≤0.5	-27...-60
HRL10APC	Diamond	0.12	≥-32
E2000	EU	0.2	-50 .. -70

zdroj: P. C. Becker, N. A. Olsson, J. R. Simpson, EDFAs, Academic Press, 1999

APC - angled physical contact
nebo angle-polished connectors



13

Spojování vláken konektory

opravy centrování vlákna ve feruli

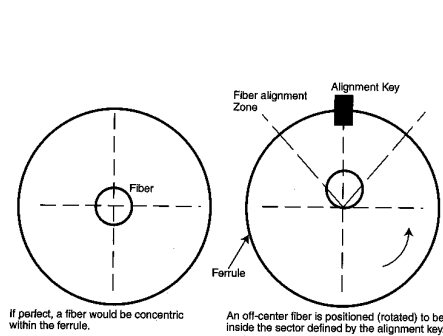
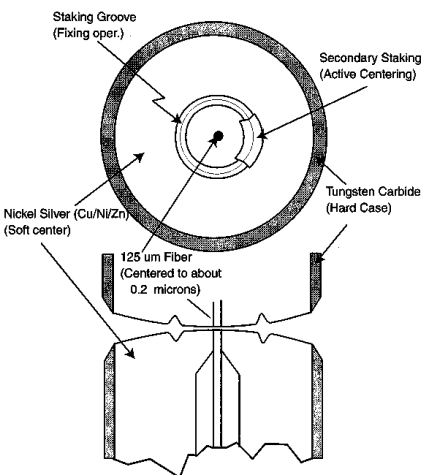


Figure C.13 Close alignment and placement of the fiber for concentricity is important for low return loss. After cementing the fiber, the ferrule is rotated and keyed so that any nonconcentricity is maintained within a narrow sector for best mating.

pomocí zarovnávacího
klíče na konektoru

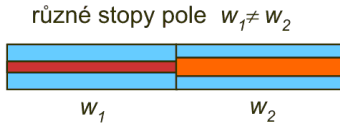
zdroj: D. Derickson, Fiber optic test and measurements, HP prof. books, 1998



pomocí měkké slitiny uprostřed ferule a úderníku
(Pilzferule, Diamond Švýcarsko, SQS - Nová Paka)

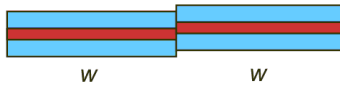
14

Ztráty na spoji dvou vláken (splice losses)

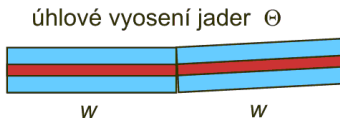


$$Loss(dB) = -20 \log \left(\frac{2w_1w_2}{w_1^2 + w_2^2} \right)$$

příčné vyosení jader (offset jader) u



$$Loss(dB) = 4.34 \times \left(\frac{u}{w} \right)^2$$



$$Loss(dB) = 4.34 \times \left(\frac{\pi w \theta}{\lambda} \right)^2$$

Chceme-li zvýšit toleranci ztrát vůči příčnému offsetu jader, povede to k menší toleranci na úhlové zarovnání vláken

15

Ztráty na spoji dvou vláken (splice losses)

Část výkonu, která je navázána do základního vidu druhého vlákna:

$$T = \left| \int_{-\infty-\infty}^{+\infty+\infty} \int \psi_1 \psi_2^* dx dy \right|^2$$

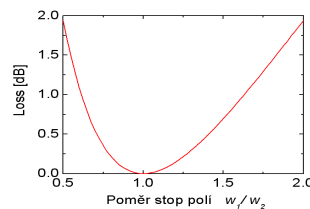
$$\psi_1(x, y) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{1}{w_1} e^{-(x^2+y^2)/w_1^2} \quad \psi_2(x, y) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{1}{w_2} e^{-[(x-u)^2+y^2]/w_2^2}$$

Gaussovy aproximace základních vidů jsou normovány tak aby platilo:

$$\int_{-\infty-\infty}^{+\infty+\infty} \int \psi_{1,2}^2 dx dy = 1 \quad \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-a^2x^2+bx} dx = \frac{\sqrt{\pi}}{a} e^{\frac{b^2}{4a^2}}$$

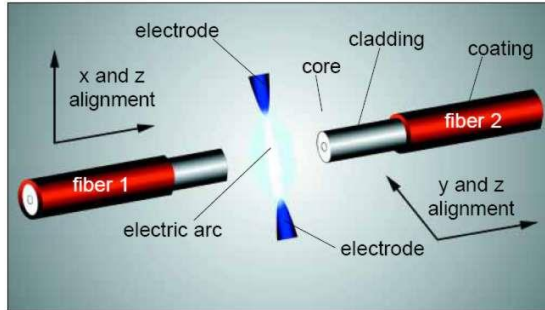
$$T = \left| \frac{2}{\pi w_1 w_2} \int_{-\infty-\infty}^{+\infty+\infty} \exp \left[-x^2 \left(\frac{1}{w_1^2} + \frac{1}{w_2^2} \right) + \frac{2xu}{w_2^2} - y^2 \left(\frac{1}{w_1^2} + \frac{1}{w_2^2} \right) - \frac{u^2}{w_2^2} \right] dx dy \right|^2 =$$

$$= \left(\frac{2w_1w_2}{w_1^2 + w_2^2} \right)^2 \exp \left[-\frac{2u^2}{w_1^2 + w_2^2} \right]$$

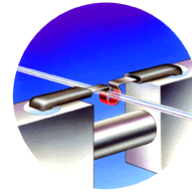


16

Spojování optických vláken svářením



Principle of thermal splicing



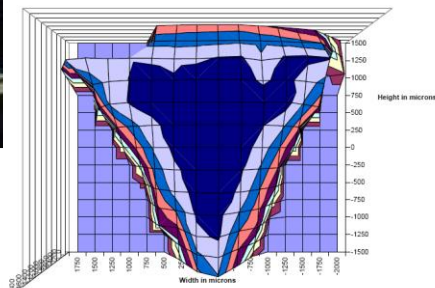
wolframové
nebo grafitové
vlákno - Vytran

Svařování obecně spočívá v natavení konců vláken a natlačení na sebe.
(elektrický oblouk, rozžhavené wolframové vlákno - Vytran, plamen)

různé rychlosti difúze dopantů (Ge, P, Al, F) \Rightarrow MFD tenkého jádra s vysokou NA
(typické EDF) se zvětšuje rychleji než u širšího jádra s malou NA (typ. SMF) \Rightarrow
podstatně menší ztráty sváru než konektorového spoje.

17

Spojování optických vláken svářením

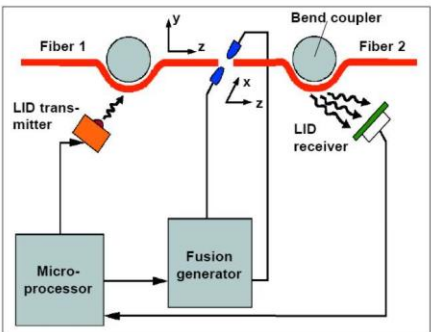
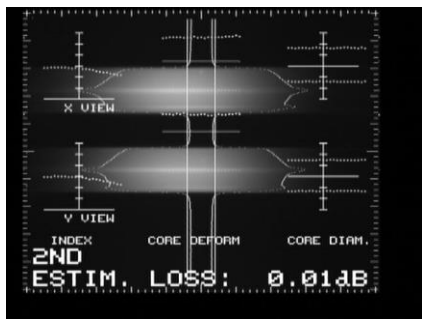


elektrický oblouk s fázově posunutým napětím na třech
elektrodách \Rightarrow konstantní rozložení teploty na relativně
velké ploše, časově stabilní, velký rozsah teplot (při
částečném vakuu již od 100°C)

www.3sae.com, Furukawa FTEL S184 Fusion Splicer

18

Nastavení optických vláken vůči sobě



Principle of the LID-System®

LID - Light Injection and Detection
RXS Siemens - Corning

hot image analysis
tato metoda umožňuje
donastavování v reálném čase
(RTC real time control, Ericsson)

pouze obrazová analýza také vede k vynikajícím výsledkům - Furukawa, Vytran

19

Zalamování vláken



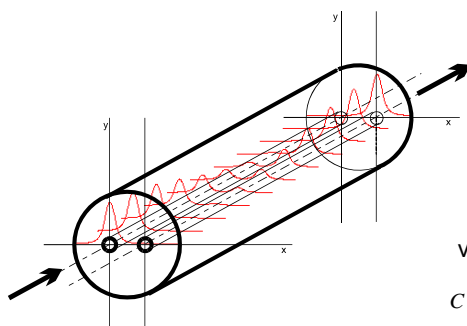
20

Sváření vláken



21

Dvoujádrové optické vlákno Twin-Core Fiber (TCF)



optický výkon v 1. a 2. jádře :

$$P_1(z) = 1 - F^2 \sin^2\left(\frac{C}{F} z\right)$$

$$P_2(z) = F^2 \sin^2\left(\frac{C}{F} z\right)$$

vazební koeficient:

$$C = k_0 \int_0^{2\pi} \int_0^\infty (n(r, \varphi) - n_1(r, \varphi)) \cdot \psi_1(r, \varphi) \cdot \psi_2(r, \varphi) r dr d\varphi$$

vazební délka

$$L_c = \frac{\pi F}{2C}$$

vazební účinnost

$$F^2 = \frac{1}{1 + \left(\frac{\beta_1 - \beta_2}{2C}\right)^2}$$

22

Coupled-Mode Theory CMT

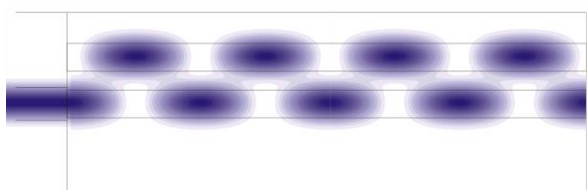
$$E_x(r, \varphi, z) = (B_1 \Psi_1(r, \varphi) + B_2 \Psi_2(r, \varphi)) e^{-j\beta z},$$

$$\beta_{\pm} = \frac{\beta_1 + \beta_2}{2} \pm \frac{C}{F}$$

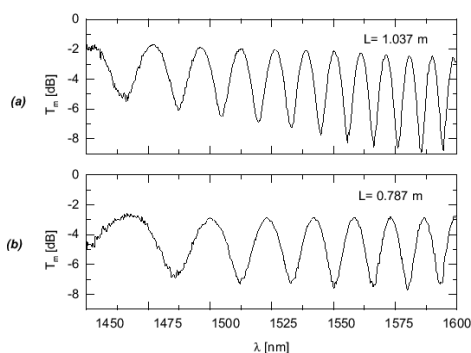
Pokud na počátku TCF
budíme jen jedno jádro \Rightarrow
oba módu jsou stejně
vybuzeny \Rightarrow záněje \Rightarrow
přelévání výkonu

23

prostorové:

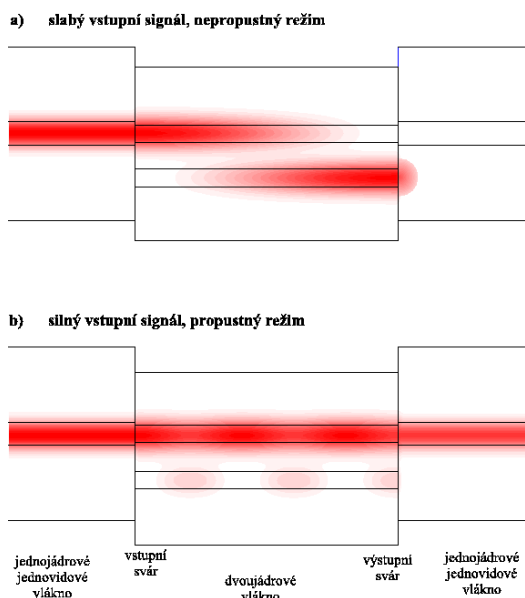


spektrální:



24

Nelineární dvoujádrový vazební člen



25

Aplikace TCF

- směrové vazební členy, polarizační děliče
- vláknový attenuátor, senzor teploty, tlaku
- nelineární přepínače výkonu pro plně optické zpracování signálu (+řídící výkonný pulz)
- vlnový demultiplexer
- Er dopované TCF pro vyrovnání výkonu WDM kanálů zesilovaných v EDFA
- spektrální filtry pro vyhlazení zisku EDFA

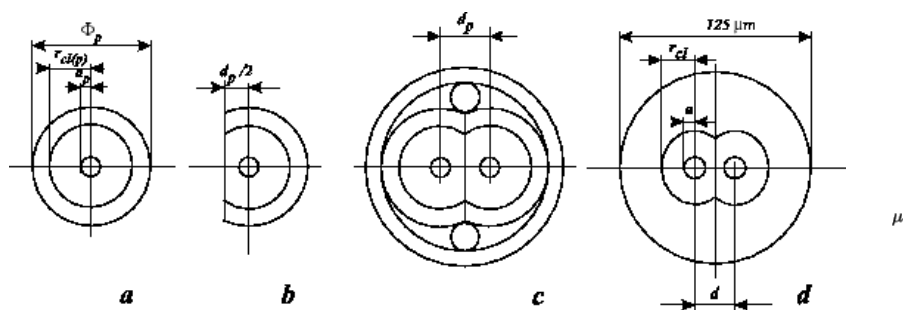
nelineární přepínač pro pasivní vidovou synchronizaci vláknového laseru

využití mezividové disperze symetrického a antisymetrického vidu TCF pro vidovou synchronizaci vláknového laseru

ErTCF úzkopásmový sledovací (tracking) filtr založený na saturaci absorpce; využití pro stabilizaci pracovní vlnové délky a zúžení šířky čáry laseru

26

Spektrální filtry - dvoujádrová vlákna



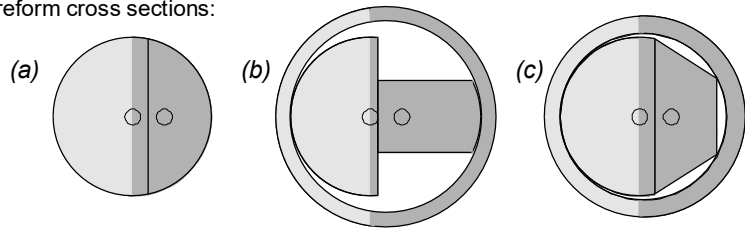
Postup přípravy doujádrového vlákna:
(a) řez typickou preformou jednojádrového vlákna, její průměr je cca 10 mm,
(b) po jedné straně zbroušená preforma do tvaru písmene D,
(c) dvoujádrová preforma v přeplášťovací trubce,
(d) řez vytaženým vláknem (průměr 125 μ m).

27

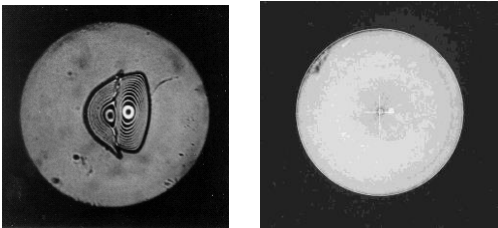
Spektrální filtry - dvoujádrová vlákna

Preparation of TCF for easy splicing with standard fibres

Preform cross sections:



Microphotograph of the drawn fibre cross section:



Ref: P. Peterka, I. Kasik, J. Kanka, P. Honzátko, V. Matejcek, and M. Hayer, "Twin-core fibre design and preparation for easy splicing", IEEE Photonics Technology Lett., vol. 12, no. 12, pp. 1656-1658, 2000.

28

Spektrální filtry - dvoujádrová vlákna

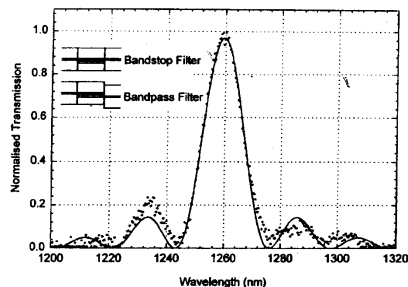


Fig. 1. Measured bandpass filter response (dots) with the theoretical prediction (solid line). The filter used a TC fiber 1.8 cm long. The FWHM bandwidth is 17.7 nm.

Velmi rozdílná jádra \Rightarrow účinná vazba jen v úzkém pásmu vlnových délek.
Dolaďování je možné protahováním.

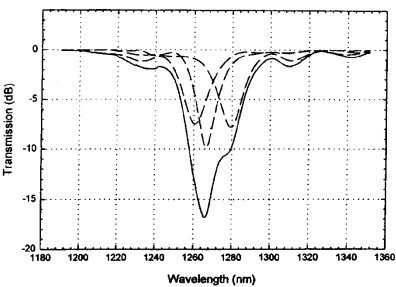


Fig. 4. A loss filter consisting of three separate filters. The solid line represents the response of the combined device. Dashed lines are the original filter responses.

Příklad syntézy zadaného spektrálního profilu ze tří TCF různých délek. pro pásmo 1550 nm by musela být navržena silná vazba pro $\lambda \sim 1600$ nm.

B. Ortega and L. Dong, "Characteristics of mismatched twin-core fiber spectral filters", *IEEE Photonics Technology Letters*, 10 (7), 991-993, 1998.

Další filtry pro vyhlazení zesílení EDFA jsou kromě LPG a TCF mnohovrstevnaté interf. filtry.

Nobelova cena za fyziku 2009: Kuen Charles Kao

Dielectric-fibre surface waveguides for optical frequencies

K.C. Kao and G.A. Hockham

Indexing terms: Optical fibres, Waveguides

Abstract: A dielectric fibre with a refractive index higher than its surrounding region is a form of dielectric waveguide which represents a possible medium for the guided transmission of energy at optical frequencies. The particular type of dielectric-fibre waveguide discussed is one with a circular cross-section. The choice of the mode of propagation for a fibre waveguide used for communications purposes is governed by considerations of loss characteristics and information capacity. Dielectric loss, bending loss and radiation loss are discussed, and mode stability, dispersion and power handling are examined with respect to information capacity. Physical realisation aspects are also discussed. Experimental investigations at both optical and microwave wavelengths are included.



Paper 3033E was originally published in the *Proceedings IEE*, July 1966. It was first received 26th November 1965 and in revised form 15th February 1966. The authors were formerly with Standard Telecommunication Laboratories Ltd., Harlow, Essex. Prof. Kao is now with ITT and Dr. Hockham is with Plessey Company Ltd., 241 Station Road, Addlestone, Surrey, United Kingdom

IEE PROCEEDINGS, Vol. 133, Pt. J, No. 3, JUNE 1986

for the second fibre; by offsetting the second fibre, different mode patterns from the one carried by the first fibre could

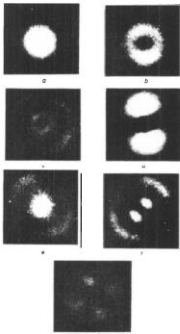


Fig. 16 Photographs of light patterns produced by modes

be observed, if the second fibre was not a single-mode structure.

7 Conclusions

Theoretical and experimental studies indicate that a fibre of glassy material constructed in a clad structure with a core diameter of about $100 \lambda_0$ represents a possible practical optical waveguide with important potential as a new form of communication medium. The refractive index of

the core needs to be about 1% higher than that of the cladding. This form of waveguide operates in a single HE_{11} , E_0 or H_0 mode and has an information capacity in excess of 1 GHz. It is completely flexible and calls for a mechanical tolerance of around 10%, which can be readily met in practice. Thus, compared with existing coaxial-cable and radio systems, this form of waveguide has a larger information capacity and possible advantages in basic material cost. The realisation of a successful fibre waveguide depends, at present, on the availability of suitable low-loss dielectric material. The crucial material problem appears to be one which is difficult but not impossible. Certainly, the required loss figure of around 20 dB/km is much higher than the lower limit of loss figure imposed by fundamental mechanisms.

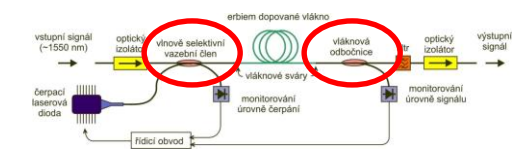
8 Acknowledgment

The authors wish to acknowledge the contribution of Mr. R.W. Lomax in carrying out the fibre-mode experiment and dielectric-loss measurements, and to thank Standard Telecommunication Laboratories Ltd. for permission to publish the paper.

9 References

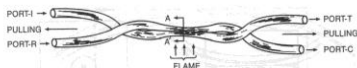
- 1 COLLIN, R.E.: 'Field theory of guided waves' (McGraw-Hill, 1960).
- 2 MAURER, R.D.: 'Light scattering by glasses', *J. Chem. Phys.*, 1956, 25, p. 1296.
- 3 STEELE, F.N. and DOUGLAS, R.W.: 'Some observations on the absorption of iron in silicate and borate glasses', *Phys. Chem. Glasses*, 1965, 6, p. 246.
- 4 GOUBAU, G.: 'Single conductor surface wave transmission line', *Proc. Inst. Radio Eng.*, 1951, 39, p. 619.
- 5 ELLIOTT, R.S.: 'Asymmetrical surface waves on circular cylinders', *J. Appl. Phys.*, 1955, 26, p. 548.
- 6 POTTER, S.V.: 'Propagation in the azimuth direction of a cylindrical surface wave', Ph.D. Thesis, University College London, 1963.
- 7 BREITHAUPT, R.W.: 'The diffraction of a cylindrical surface wave by surface discontinuities', Ph.D. Thesis, University College London, 1965.
- 8 HOCKHAM, G.: 'Surface wave propagation on varying reactive cylindrical structures', Ph.D. Thesis, 1966, University of London.
- 9 JONES, A.L.: 'Coupling of optical fibres and scattering in fibres', *J. Opt. Soc. Amer.*, 1965, 55, p. 201.
- 10 SAVARD, J.Y.: 'An investigation of higher order surface waves on cylindrical structures', Ph.D. Thesis, University College, London, 1961.
- 11 BARLOW, H.E.M. and KARBOWIAK, A.E.: 'An experimental investigation of the properties of corrugated cylindrical surface waveguide', *Proc. IEE*, 1956, 104, Pt. III, p. 182.

Komponenty EDFA: WDM, vl. odbočnice

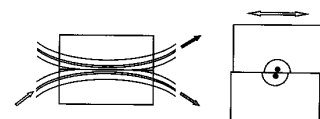


Metody výroby vazebních členů a WDM

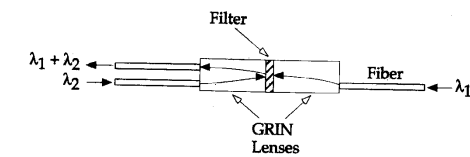
svařované vazební členy
fused couplers



stranově zbroušené
vazební členy - drahé,
mechanicky přeladitelné
side-polished fiber coupler



miniaturní tenkovrstvé interferenční filtry
filter type WDM



planární děliče výhodné pro
velký počet výstupů, 1x2^N
Photonic Lightwave Circuits, PLC



31

svařované směrové vazební členy, WDM

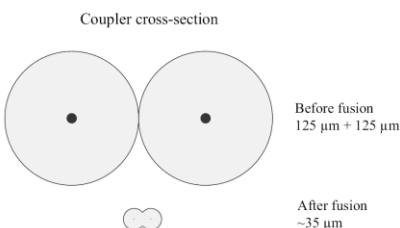
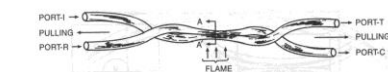
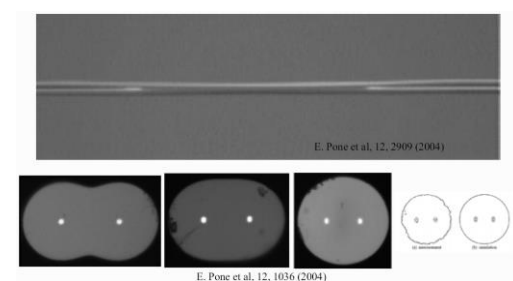


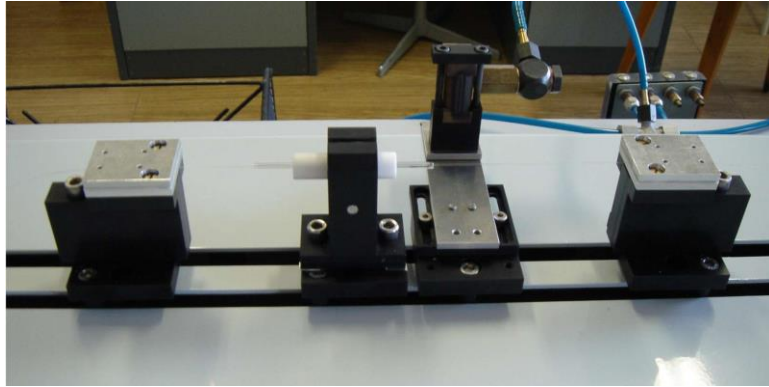
Schéma výroby vazebního členu.



Mikroskopické fotografie řezů vazebního členu v různých místech.

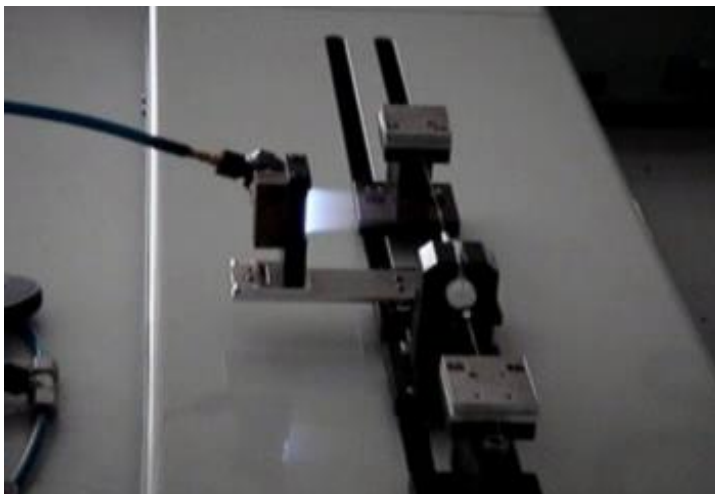
32

Zařízení na výrobu svařovaných vazebních členů a vláknových taperů v ÚFE



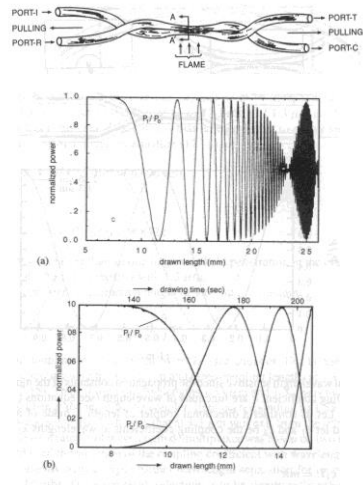
33

Zařízení na výrobu svařovaných vazebních členů a vláknových taperů v ÚFE

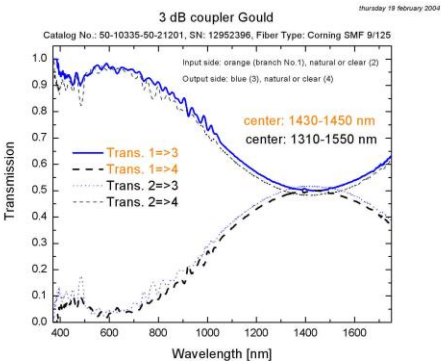


34

Svařované vazební členy, děliče výkonu



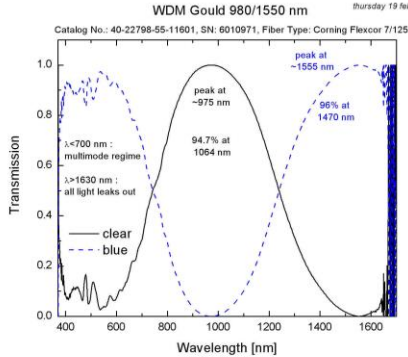
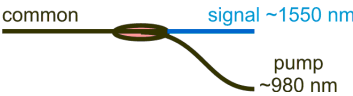
výstupní výkon v závislosti na protažení vláken
(a) výstup z jednoho vlákna
(b) jiný coupler, výstup z obou vláken



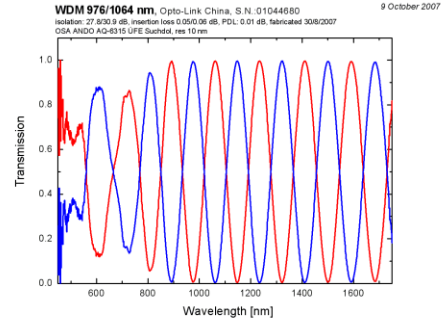
Transmise děliče výkonu/vazebního členu v poměru 50:50 (3 dB coupler/splitter) pro široký spektrální interval. Dostupné různé poměry 30:70 ... 1:99, 5:95 (fiber tap - vláknová odbočnice)

35

Transmise WDM



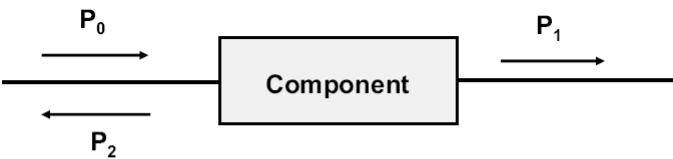
Transmise WDM pro spojení čerpání 980 nm a signálu 1550 nm, všimněte si cutoff na ~1650 nm



Transmise WDM pro spojení čerpání 976 nm a signálu 1060 nm

36

Parametry vláknových komponent - ztráty v dB



Insertion loss $\alpha_I [dB] = -10 \log (P_1 / P_0)$

Return loss $\alpha_R [dB] = -10 \log (P_2 / P_0)$

3 dB loss \longleftrightarrow 50% loss

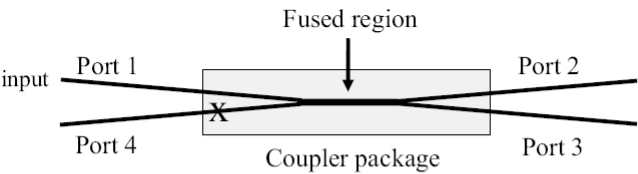
10 dB loss \longleftrightarrow 90% loss

30 dB loss \longleftrightarrow 99.9 % loss

Return loss / Back-reflection (zpětný odraz)

37

Parametry vazebních členů



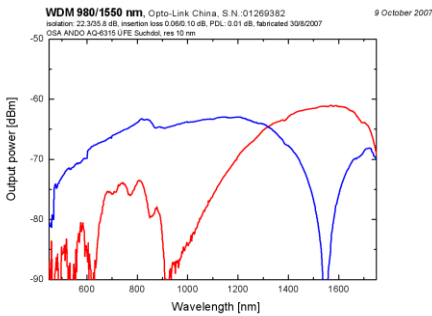
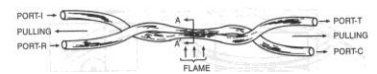
$CR(percent) = 100P_3 / (P_2 + P_3)$	CR: coupling ratio (e.g., 70/30)
$EL(dB) = -10\log((P_2 + P_3) / P_1)$	EL: excess loss (e.g., 0.2 dB)
$IL_2(dB) = -10\log(P_2 / P_1)$	IL2: insertion loss from port 1 to port 2
$IL_3(dB) = -10\log(P_3 / P_1)$	IL3: insertion loss from port 1 to port 3
	Pn: optical power at nth port

Příklad: $P_1=10.5$ mW, $P_2=3$ mW, $P_3=7$ mW (CR=70%, EL=0.2 dB, IL2=5.44 dB, IL3=1.78 dB)

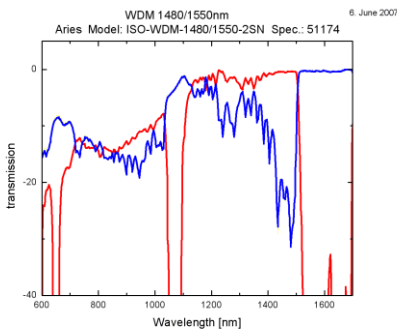
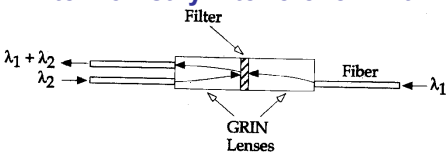
38

Srovnání WDM

Svařovaná vlákna



tenkovrstvý interferenční filtr

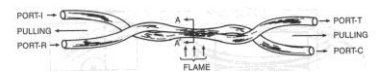


Omezený max. výkon pro WDM s tenkovrstvým interferenčním filtrem! Větší vložné ztráty, menší spolehlivost. Dříve náročnější výroba thin-film filter based WDM (⇒dražší). Širší pásmo s plochou transmisí, větší odstup (izolace) pásem, menší polarizačně závislé ztráty.

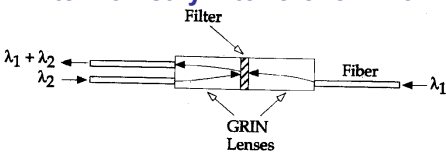
39

Srovnání WDM

Svařovaná vlákna



tenkovrstvý interferenční filtr



Srovnání WDM pro kombinování čerpání 980 nm a signálu 1550 nm

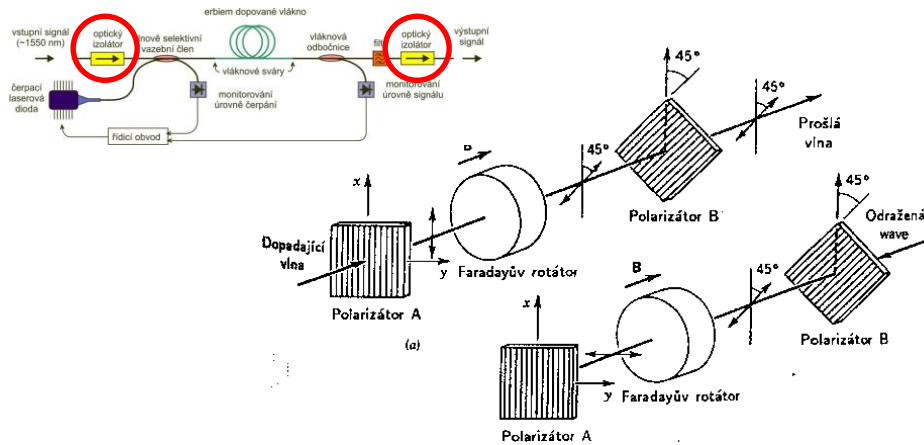
	svařovaná vlákna	interferenční filtr
Isolation (dB)	20	60 (pump)
Max. insertion Loss (dB)	0,4	0.4
Back-reflection (dB)	-55	-68
Polarization dependent Loss (dB)	≤0.1	0.015
Thermal stability (dB/°C)	≤0.002	≤0.005
Passband (nm)	20	30 (980) 60 (1550)

Omezený max. výkon pro WDM s tenkovrstvým interferenčním filtrem! Větší vložné ztráty, menší spolehlivost. Dříve náročnější výroba thin-film filter based WDM (⇒dražší). Širší pásmo s plochou transmisí, větší odstup (izolace) pásem, menší polarizačně závislé ztráty.

40

Optický izolátor

In case of polarizing isolator (polarisation sensitive isolator) the two SWP are replaced by simple polarizers.

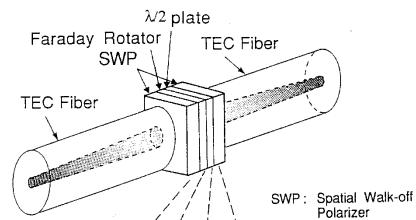
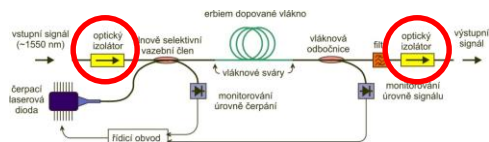


Obrázek 6.6-5 Optický izolátor používající polarizační rotátor založený na Faradayově jevu propouští světlo v jednom směru (a) a v opačném směru světlo nepropouští (b).

B. E. A. Saleh and M. C. Teich. "Zaklady fotoniky", MATFYZPRESS, Praha, 1994-96.

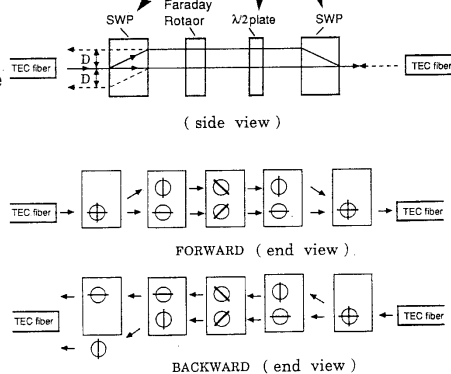
41

Optický izolátor



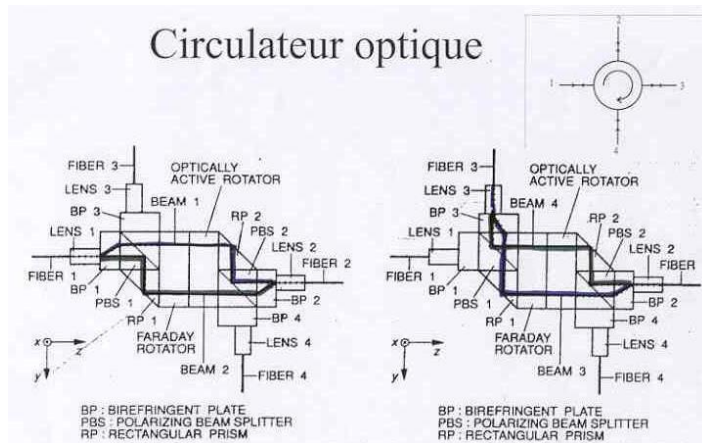
TEC - thermally expanded core
SWP - spatial walk-off plate, e.g. birefringent rutile (TiO_2 - oxid titaničitý, rutil) wedge
Farady rotator - e.g. Yttrium Iron Garnet (YIG) crystal + permanent magnet
spectral&temp dependence due to F.rot.material
insertion&return loss - AR coatings&alignment

typical parameters: isolation>75 dB (1460-1570nm)
insertion loss 0.5 dB, return loss 65 dB



42

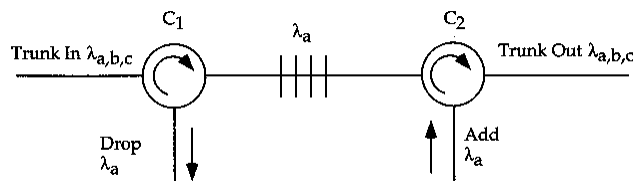
Optický cirkulátor



birefringent plate - krystal kalcitu, uhličitá vápenatého CaCO_3 , islandský vápenec
 Faraday rotator - krystal GBIG (Bismuth-substituted Gadolinium Iron Garnet)+ Sm-Co magnet,
 opticky aktivní prostředí - krystal SiO_2 . Spolu otočí svazek o: $\Rightarrow 90^\circ$, $\Leftarrow 0^\circ$
 typické parametry cirkulátoru (mezi porty): vložné ztráty 0.9 dB, izolace >50 dB,
 citlivost na polarizaci 0.05 dB, polarizační disperze 0,07 ps

43

Optický cirkulátor - aplikace



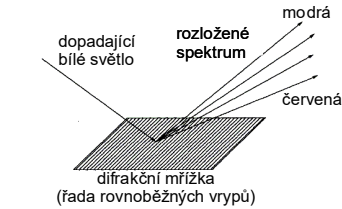
Add/drop multiplexer pro vlnovou délku λ_a sestavený ze dvou cirkulátorů a Braggovské vláknové mřížky.

další využití: kompenzátory disperze (cirkulátor+čerpovaná FBG, funguje jen ve zpětném směru!)

44

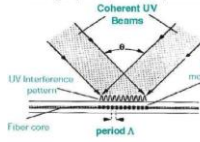
Spektrální filtry - vláknové mřížky

standardní mřížka s vrypů



FBG Fabrication:

Holographic Side-Exposure Technique



$$\Lambda = \frac{\lambda_{UV}}{2 \sin(\theta/2)}$$

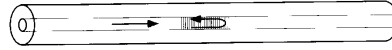
další metody zápisu:

- fázová maska
- při tažení (single shot)
- přímý/postupný zápis

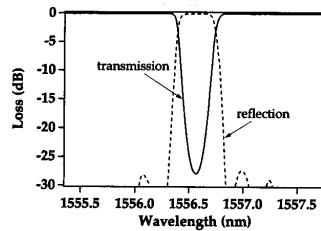
hloubka modulace n :
 10^{-4} až 10^{-3} , při sycení vodíkem (hydrogen loading) až 10^{-2}

interakci s plášťovými vidy lze:
 potlačit apodizací nebo zvýraznit zešikmení (tilted FBG)

vláknová Braggovská mřížka Fiber Bragg Grating (FBG)



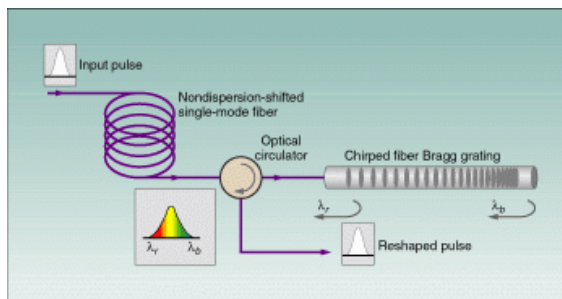
$$\vec{k}_r = \vec{k}_i + \vec{q} \Rightarrow \lambda = 2n_{eff}\Lambda$$



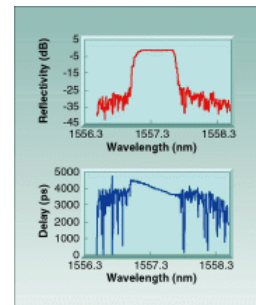
úzkopásmová FBG pro DWDM
 s odstupem signálů 50 GHz

45

Čerpované FBG pro kompenzaci disperze



10- FEA 6 Fig. 2



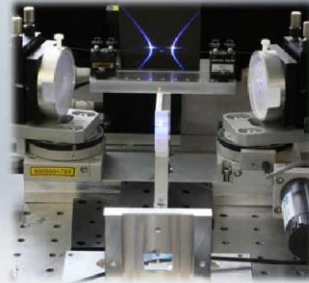
10- FEA 6 Fig. 2

from Martin Becker, "Fiber Bragg gratings for fiber lasers", Int. Training School of Fiber Lasers and Optical Fiber Technology, August 30 - September 1, Prague, Czech Republic, organized by ÚFE

Chapter 2: Grating Inscription Methods

From a myriad of inscription methods the following will be targeted:

- 1) Internal Writing
- 2) Point by point (pbp)/direct writing
- 3) Phase mask inscription
- 4) Phase mask interferometer
- 5) FBG- inscription during fiber drawing



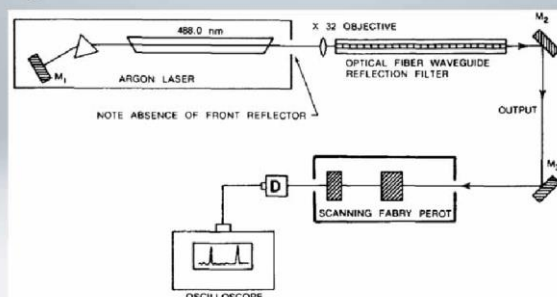
ipht-jena

Leibniz
Leibniz-Gemeinschaft

47

Internal Writing

Standing wave of an Ar⁺-laser at 488nm forms a permanent grating in a single mode fiber.



K. O. Hill et al., "Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication," *Appl. Phys. Lett.* 32, p. 647649, 1978.

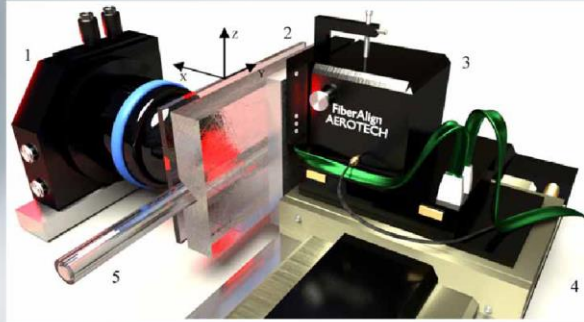
Leibniz
Leibniz-Gemeinschaft

from Martin Becker, "Fiber Bragg gratings for fiber lasers", Int. Training School of Fiber Lasers and Optical Fiber Technology, August 30 - September 1, Prague, Czech Republic, organized by ÚFE

48

Point by Point Inscription

Each grating fringe is engraved individually



- Method straight forward
- Great wavelength and design freedom
- Suitable for IR-femtosecond-lasers

S. Antipov, et al.: "Direct infrared femtosecond laser inscription of chirped fiber Bragg gratings," Opt Express 24(1), p. 30, 2016.

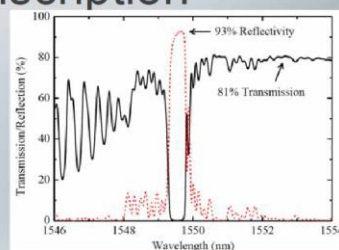
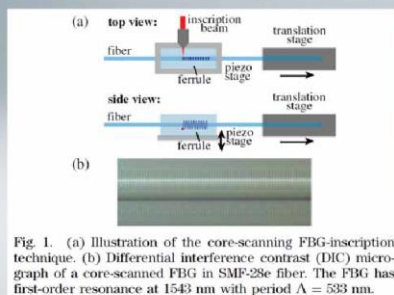
from Martin Becker, "Fiber Bragg gratings for fiber lasers", Int. Training School of Fiber Lasers and Optical Fiber Technology, August 30 - September 1, Prague, Czech Republic, organized by ÚFE

49

Plane-by-plane method: A. Theodosiou, J. Aubrecht, P. Peterka, I. Kasik, F. Todorov, O. Moravec, P. Honzatkó, and K. Kalli, "Er/Yb double-clad fiber laser with fs-laser inscribed plane-by-plane chirped FBG laser mirrors," IEEE Photonics Technology Letters, vol. 31, pp. 409-412, 2019.

Point by Point Inscription

- Sensitive to stitching errors
- Blurred spectra and high losses
- Solution: scanning techniques



Williams, R. J. et al., Optimizing the net reflectivity of point-by-point fiber Bragg gratings: the role of scattering loss, Opt. Express, 2012, 20, 13451-13456

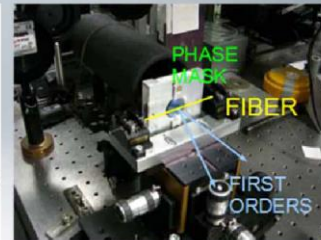
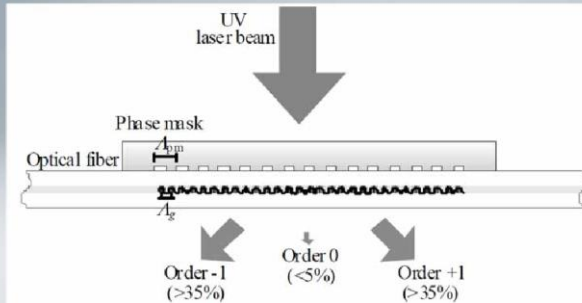
Williams, R. J., Femtosecond direct-writing of low-loss fiber Bragg gratings using a continuous core-scanning technique, Opt. Lett., 2013, 38, 1918-1920

from Martin Becker, "Fiber Bragg gratings for fiber lasers", Int. Training School of Fiber Lasers and Optical Fiber Technology, August 30 - September 1, Prague, Czech Republic, organized by ÚFE

50

Phase Mask Inscription

Fiber is placed in close proximity to a phase mask optimized for first order scattering



M. Melo and P. V. S. Marques, "Fabrication of tailored Bragg gratings by the phase mask dithering/moving technique," *Photon. Sensors* 3(1), p. 8196, 2013.

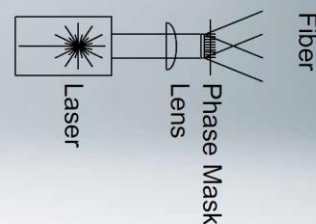
from Martin Becker, "Fiber Bragg gratings for fiber lasers", Int. Training School of Fiber Lasers and Optical Fiber Technology, August 30 - September 1, Prague, Czech Republic, organized by ÚFE

51

Phase Mask Inscription

Mostly used and attractive, due to simplified manufacturing process

- ☺ Easy alignment
- ☺ Reduced stability requirement
- ☺ Uncritical coherence requirements
- ☹ No wavelength versatility
- ☹ FBG design bound to phase mask
- ☹ FBG close to phase mask

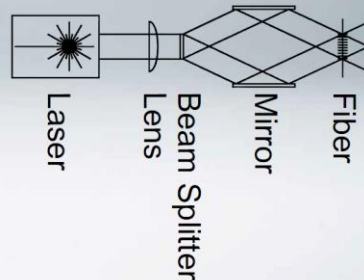


from Martin Becker, "Fiber Bragg gratings for fiber lasers", Int. Training School of Fiber Lasers and Optical Fiber Technology, August 30 - September 1, Prague, Czech Republic, organized by ÚFE

52

Phase Mask Interferometer

The fiber is placed into two crossing beams, which form a standing wave pattern along the fiber axis. If fiber is photosensitive, the pattern is imprinted into the fiber and forms a fiber Bragg grating.

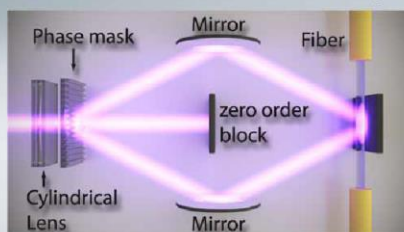


from Martin Becker, "Fiber Bragg gratings for fiber lasers", Int. Training School of Fiber Lasers and Optical Fiber Technology, August 30 - September 1, Prague, Czech Republic, organized by ÚFE

53

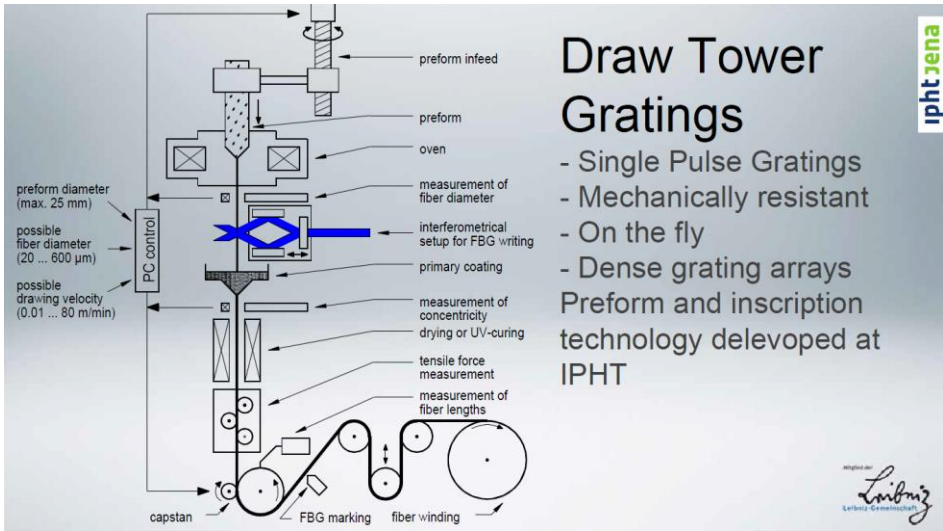
Phase-Mask Interferometer

- Two Beam Interference – wavelength versatility (460nm-2100nm)
- Filtering of first orders leads to clean fringes.
- Setup works contact-free
- Inscription during fiber drawing
- DUV femtosecond laser compatible



from Martin Becker, "Fiber Bragg gratings for fiber lasers", Int. Training School of Fiber Lasers and Optical Fiber Technology, August 30 - September 1, Prague, Czech Republic, organized by ÚFE

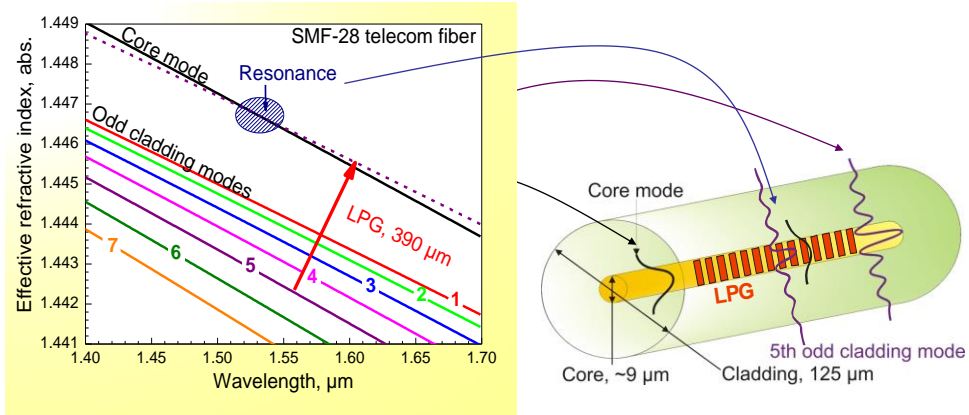
54



from Martin Becker, “Fiber Bragg gratings for fiber lasers”, Int. Training School of Fiber Lasers and Optical Fiber Technology, August 30 - September 1, Prague, Czech Republic, organized by ÚFE

Vláknové mřížky s dlouhou periodou

Fiber Long Period Gratings (LPG)



$$\vec{k}_i = \vec{k}_s + \vec{q} \Rightarrow \lambda = \Lambda (n_{eff}^{core} - n_{eff}^{clad})$$

R. Slavík, M. Kulishov, Y. Park, J. Azaña, and R. Morandotti, Temporal differentiation of sub-picosecond optical pulses using a single long period fiber grating, CLEO'06, Long Beach, CA, USA, paper CTuBB5, May 2006.

Vláknové mřížky s dlouhou periodou

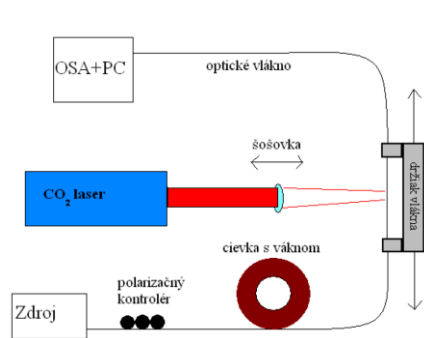
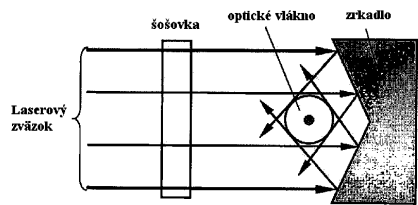


Schéma aparatury s CO₂ laserem pro zápis LPG vláknových mřížek v ÚFE Kobylysy.



Obr. 7.17. Usporiadanie podľa Grubského metódy: Laserový svazok je cylindrickou šošovkou sústredený na vlákna, za ktorým je umiestnené zrkadlo tak, že odrazové plochy zvierajú spolu 120° a vzdialenosť medzi šošovkou, vláknom a zrkadlom je nastavená tak, aby hustota výkonu dopadajúca na vlákno bola po celom obvode vlákna konštantná.

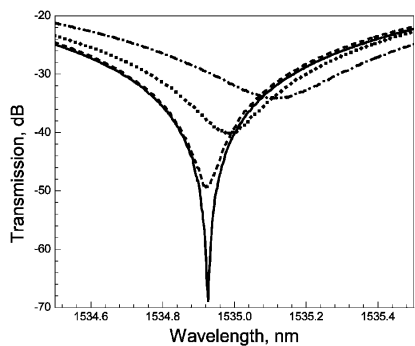
Na rozdiel od Grubského metódy som vo svojom experimente nevyužil cylindrickú šošovku ale využíval som prejazd vláknom laserovým svazkom vo vertikálnom smere. Toto nastavenie nám umožnilo zápis mriežok tak, že sa vlákno osvetlí laserovým svazkom nielen z prednej strany ale rovnomerne po celom povrchu.

možné vysvětlení vzniku LPG - v místě osvětleném CO₂ laserem se uvolní mechanické prnutí "zamrzlé" při tažení optického vlákna. Osvícení jen z jedné strany ⇒ polarizační závislost LPG.

Miro Hospodár, Vlákňové mriežky s dlhou periódou pre tvarovanie ultrakrátkych optických pulzov, diplomová práca MFF UK, 2007

57

Vláknové mřížky s dlouhou periodou



60 dB útlum na rezonanční vlnové délce. Doladění napínáním mřížky.



Aparatura s CO₂ laserem pro zápis LPG vláknových mřížek v ÚFE Kobylysy.

R. Slavík, Extremely deep long-period fiber grating made with CO₂ laser, *IEEE Photonics Technology Letters*, 18 (16), 1705-1707, 2006.

58

LPG mřížky pro vyrovnání spektrální závislosti zesílení EDFA

EDFA gain flattening filter

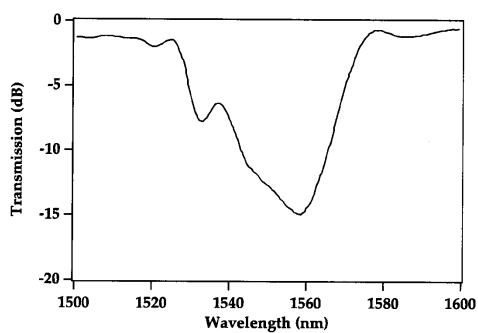


Figure 3.16: Spectral transmission characteristic of a long period grating fiber filter used to flatten the gain (to within 1 dB) over 40 nm centered at 1550 nm, of an erbium-doped fiber amplifier. From reference [71].

P. F. Wysocki et al., "Erbium-doped fiber amplifier flattened beyond 40 nm using long-period gratings," In Proc. **OFC'97**, vol. 6. p.375-378, 1997.