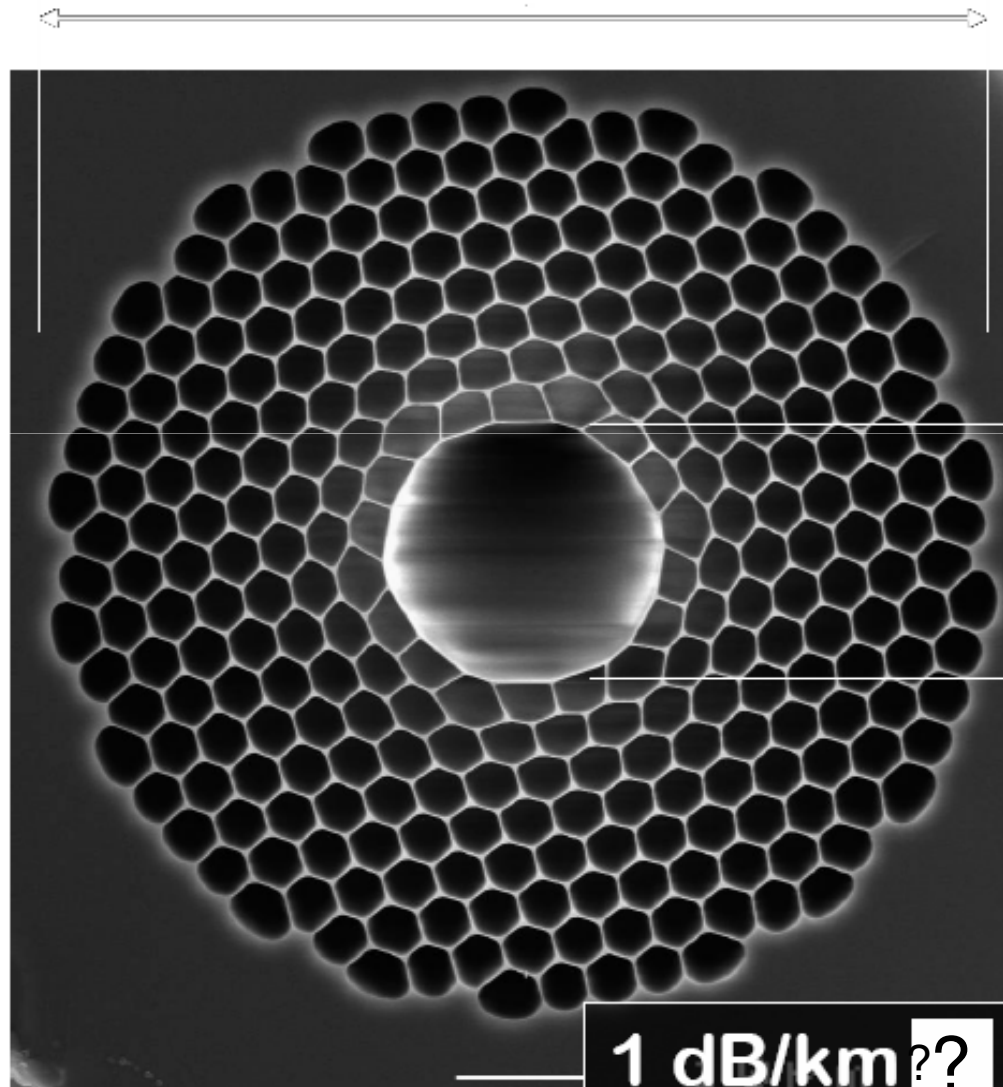


# Teme prihodnjih predavanj

- Uvod v nastanek optičnih komunikacij
- Temeljni optični pojavi
- Optično vlakno
- Slabljenje v optičnem vlaknu
- Disperzija v optičnem vlaknu
- Kompenzacija disperzije
- Nelinearnost v optičnem vlaknu
- Mikrostrukturalna vlakna
- Zvari in konektorji
- Sestavni deli optične zveze
- Optični viri
- Optični detektorji
- Optični ojačevalniki
- Oddajniki in sprejemniki
- Signali in šumi
- Modulacijski formati
- Razvrščanje
- Razvrščanje WDM
- Optična zveza
- Optična omrežja
- Optično dostopovno omrežje
- Nove tehnologije v transportnem omrežju
- Nove tehnologije v dostopovnem omrežju
- Optične koherentne zveze
- Radio po vlaknu
- Optika v mobilnih omrežjih
- Primeri preprostih zvez
- Optika v notranjih prostorih
- .....

# Mikrostrukturna vlakna



Mobitel d.d.,  
izobraževanje

14. 5. 2010,  
predavanje 8

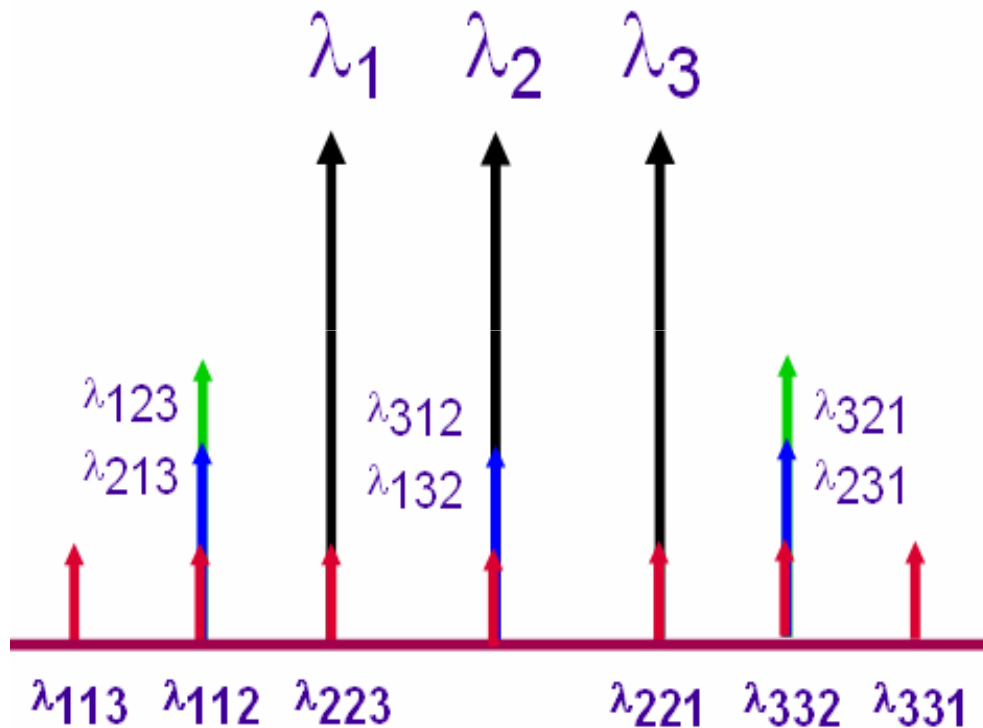
Prof. dr. Jožko  
Budin

# Vsebina

1. Principi utesnitve polja v sredici vlakna
  - Popolni notranji odboj
  - Popolni notranji lom
  - Odboj od periodične strukture
2. Vlakno s polno sredico in luknjičasto oblogo
  - Posebne lastnosti vlakna (disperzija, efektivna površina)
3. Vlakno s polno sredico in periodično strukturo v oblogi
4. Vlakno z votlo sredico in periodično strukturo v oblogi
5. Področja uporabe

# Nelinearni pojavi v vlaknu

Štiri-fotonsko mešanje



$$P(t) \propto \chi^{(1)} E(t) + \chi^{(2)} E^2(t) + \chi^{(3)} E^3(t) + \dots$$

$$D = \varepsilon_0 E + P$$

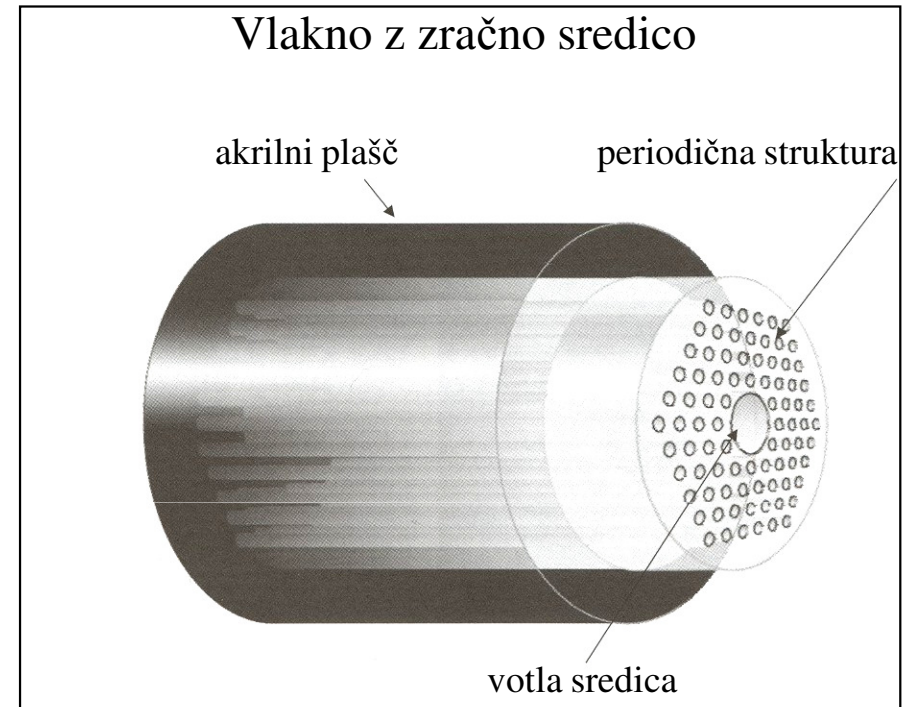
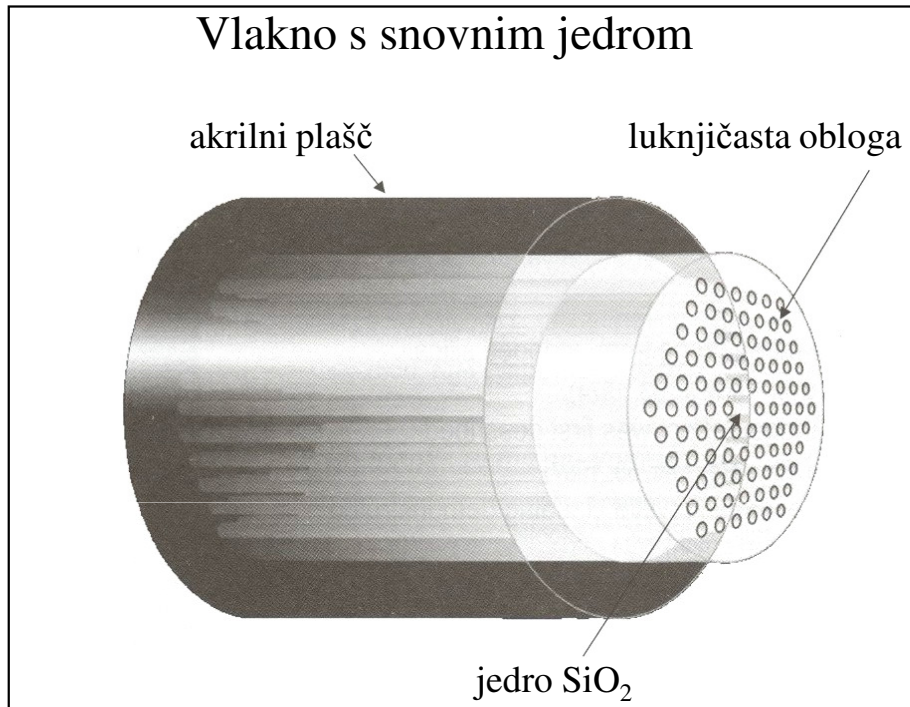
Mobitel d.d.,  
izobraževanje

23. 4. 2010,  
predavanje 8

Prof. dr. Jožko  
Budin

# FOTONIČNO KRISTALNO VLAKNO

- Dve vrsti fotoničnega kristalnega vlakna:



- **Princip:** znižan povprečni lomni količnik

- **Dosežki:**

- velika efektivna površina (linearno vlakno)
- majhna efektivna površina (nelinearno vlakno)
- nenavadne disperzijske lastnosti
- širokopasovna enorodovnost

- **Princip:** zaporna periodična struktura v oblogi

- **Stanje:**

- novosti v perspektivi

# Načini vodenja svetlobe po vlaknu

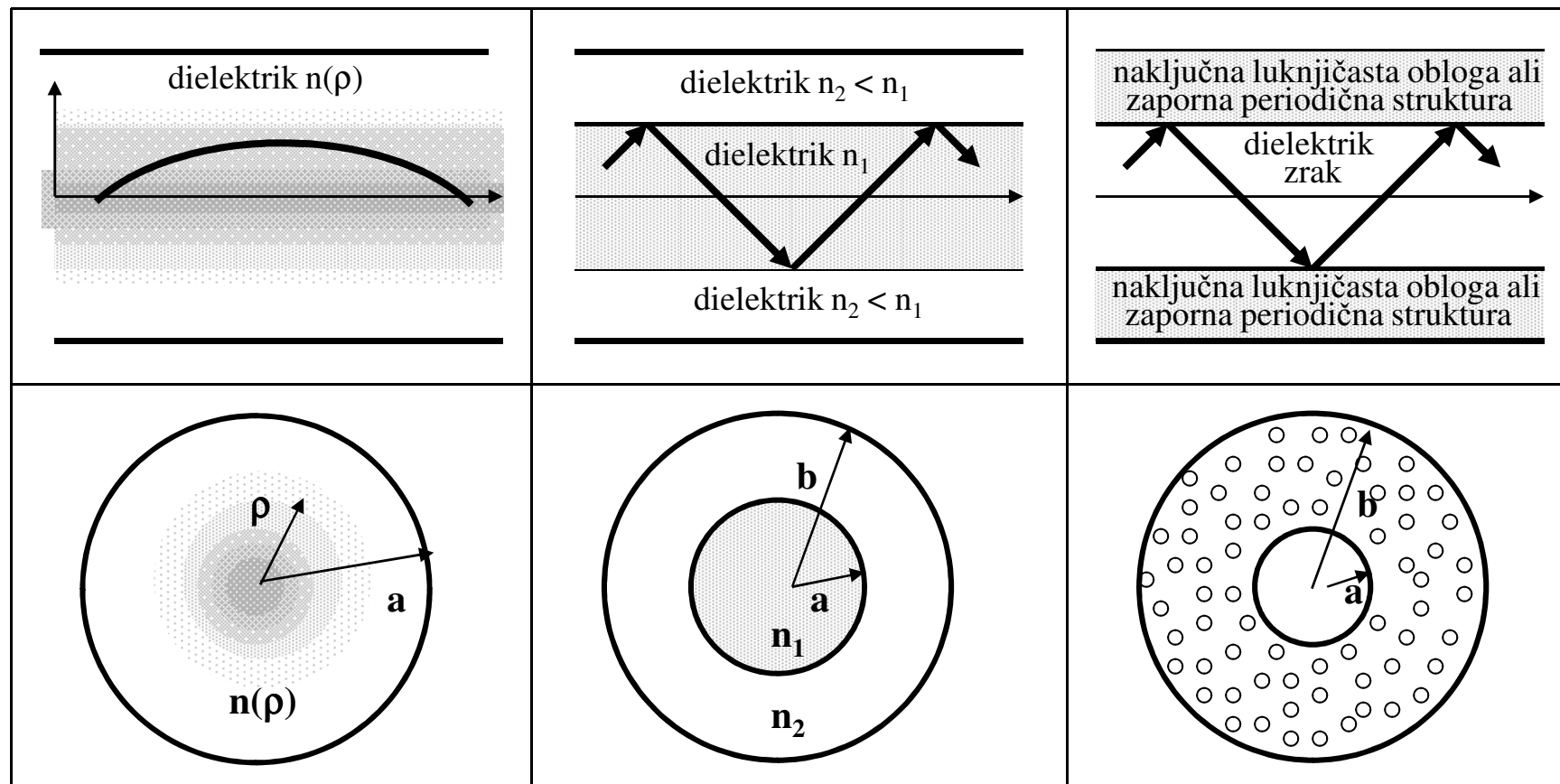
- Optični valovodi - svetlovodi
  - planarni svetlovodi (integrirana tehnika)
  - vlakenski svetlovodi (prenos, različne naprave)

## • Mehanizmi vodenja valovanja po svetlovodu:

• LOM

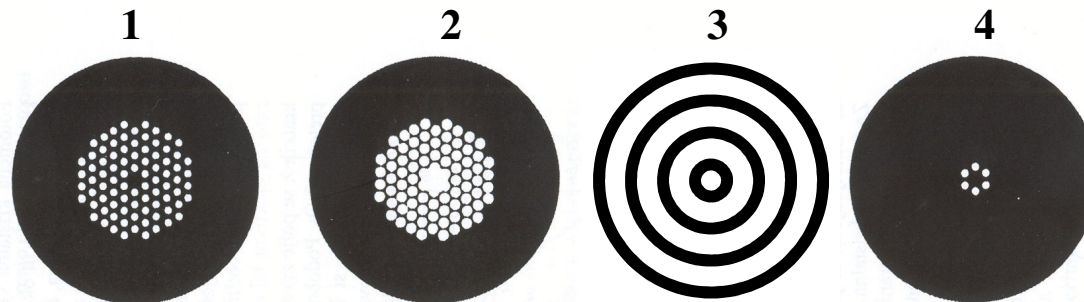
• POPOLNI NOTRANJI ODBOJ

- $n_{ef}$  OBLOGE ali
- ZAPORNI PAS



Valovni rodovi: hibridni HE ali EH (valovi TE in TM so poseben primer, TEM ne obstaja)

# FOTONIČNA KRISTALNA VLAKNA - vrste



## 1. Luknjičasto (kapilarno) vlakno (Holey Fiber)

- (ne)regularna periodična struktura v oblogi
- znižan efektivni lomni količnik obloge, **totalni odboj**

## 2. Pasovno - zaporno vlakno (Photonic Band - Gap Fiber)

- strogo regularna dvodimenzionalna periodična struktura v oblogi
- zračna sredica, **prečna zapora**

## 3. Bragovo vlakno (Bragg Fiber)

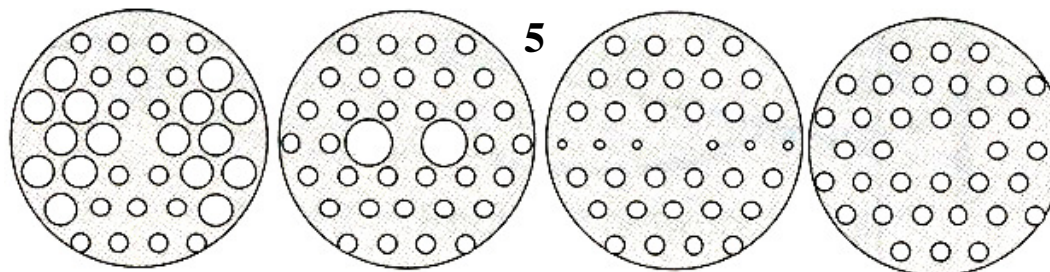
- strogo regularna valjna periodična struktura v oblogi
- zračna sredica, **Braggova prečna zapora**

## 4. Mikrostrukturalna vlakna (Microstructured Fiber)

- posebna porazdelitev visokega kontrasta lomnega količnika za doseganje posebnih karakteristik vlaken

## 5. Dvolomno (polarizacijsko ohranjajoče) vlakno (Polarization Maintaining Fiber)

- vrsta luknjičastega vlakna z nesimetričnim jedrom



## 2. FOTONIČNA KRISTALNA VLAKNA - Vrste in karakteristike

### Photonic Cristal Fibers (PCF)

#### 1. Vlakno s polno (snovno) sredico ( $\text{SiO}_2$ ) - dosežene karakteristike:

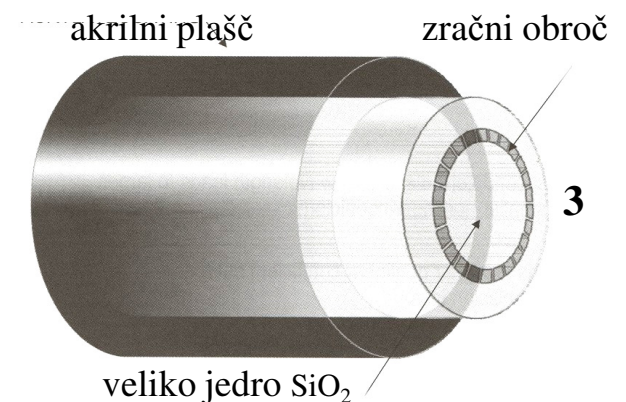
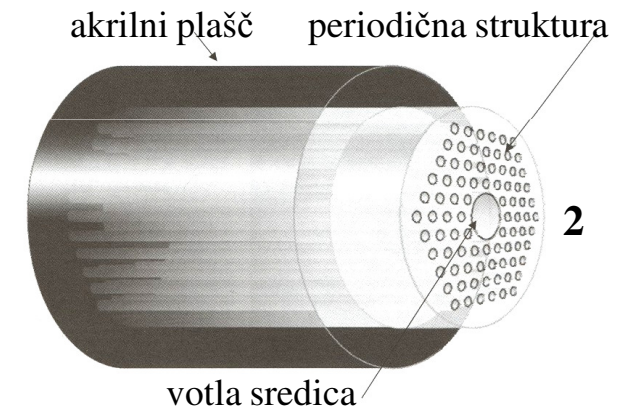
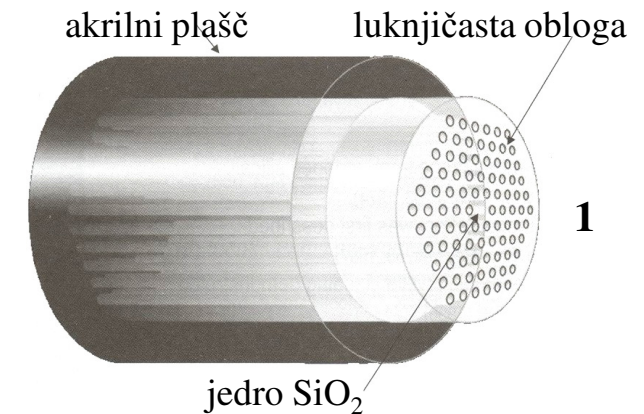
- vlakno zelo velike efektivne površine - zelo nizka nelinearnost
- vlakno zelo majhne efektivne površine - zelo visoka nelinearnost
- vlakno različne in neobičajne kromatske disperzije:
  - izravnani potek kromatske disperzije
  - visoka pozitivna ali negativna vrednost disperzije
  - anomalno disperzija ( $D > 0$ ) v vidnem spektru
- vlakno zelo velike numerične odprtine
- dvolomno vlakno za ohranitev polarizacije
- prenosno vlakno nizkega slabljenja za visok bitni prenos na veliko razdaljo

#### 2. Vlakno z votlo (zračno) sredico - pričakovane karakteristike:

- nizko Rayleighovo sipanje in s tem zelo nizko skupno slabljenje
- visoka prenašena moč
- zelo nizka vrednost nelinearnega koeficienta
- odsotnost polarizacijske rodovne disperzije
- možnost zelo velikega dosega brez vmesnega ojačevanja
- zelo zahtevna tehnologija, rezultat negotov

#### 3. Mikrostrukturno vlakno za različne učinke

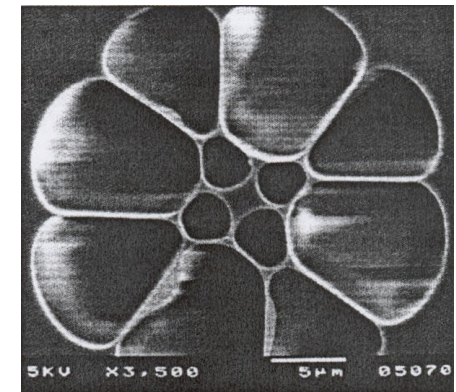
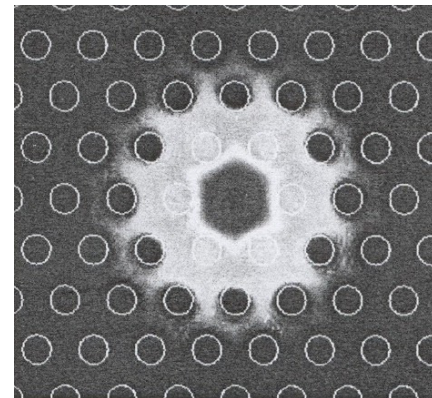
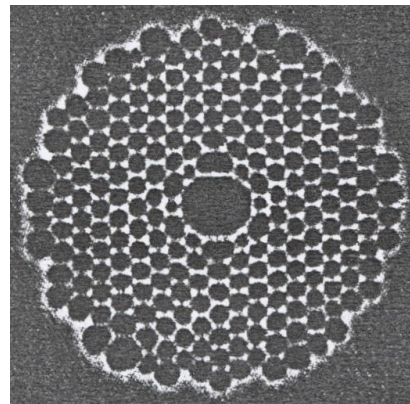
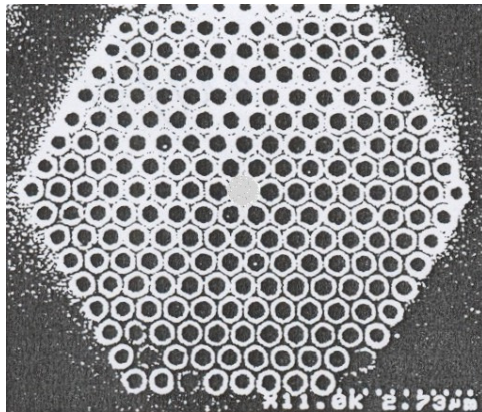
- visoka numerična odprtina
- posebne disperzijske karakteristike



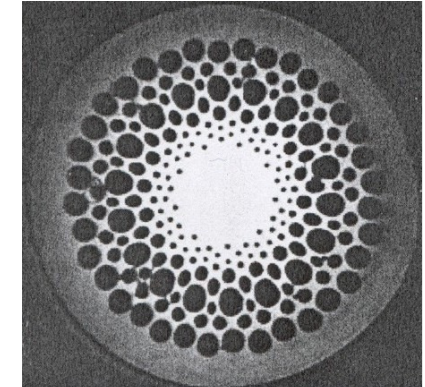
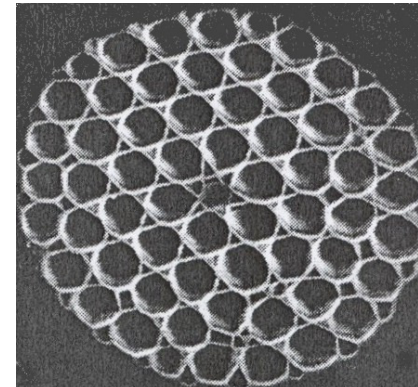
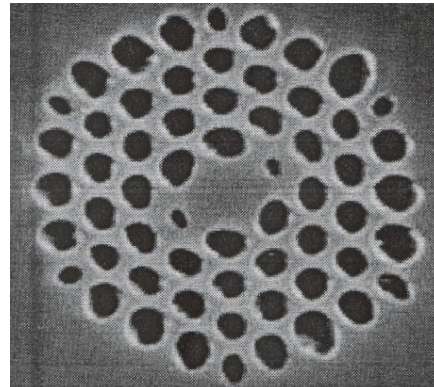
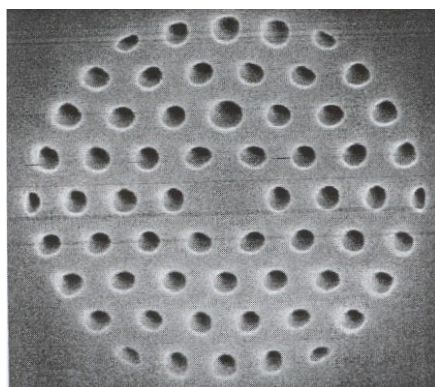


## 4. FOTONIČNA KRISTALNA VLAKNA - galerija struktur

1. Sredica  $\text{SiO}_2$  . Luknjičasta obloga  $\text{SiO}_2$  - zrak
2. Sredica zrak - strogo periodična struktura  $\text{SiO}_2$  - zrak
3. Porazdelitev svetlobe v sredici in okoli nje
4. Sredica  $\text{SiO}_2$  - obloga  $\text{SiO}_2$  - zrak, majhna  $A_{\text{ef}}$  - visoka nelinearnost



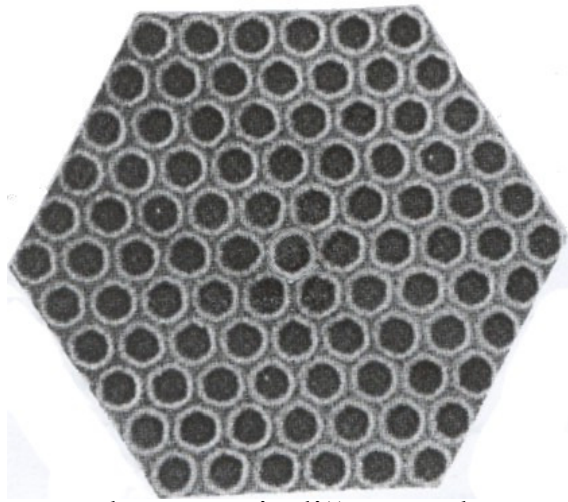
5. Sredica  $\text{SiO}_2$  - obloga  $\text{SiO}_2$  - zrak, velika  $A_{\text{ef}}$ , nizka nelinearnost
6. Dvolomno vlakno, ohranitev polarizacije
7. Mnogorodovno vlakno, sredica  $\text{SiO}_2$ , luknjičasta obloga
8. Mnogorodovno gradientno vlakno (material polymer)



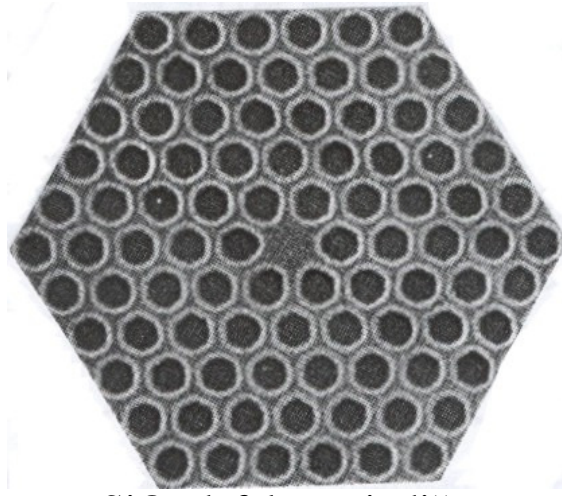
## 5. FOTONIČNA KRISTALNA VLAKNA - perturbacija strukture

Definicija: Vsaka geometrijska ali snovna perturbacija na prečnem preseku je valovod

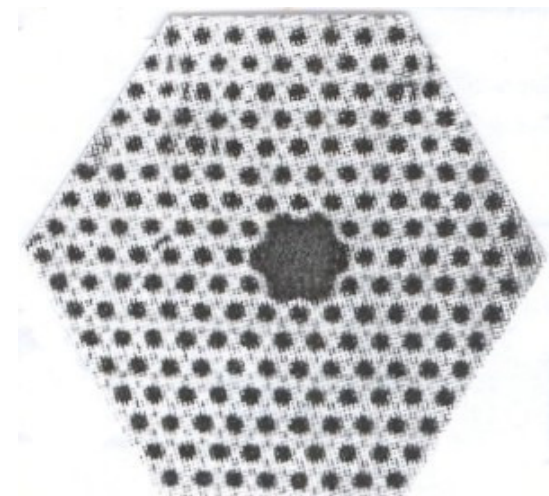
- Triangularna regularna struktura in struktura z defektom



regularna periodična struktura

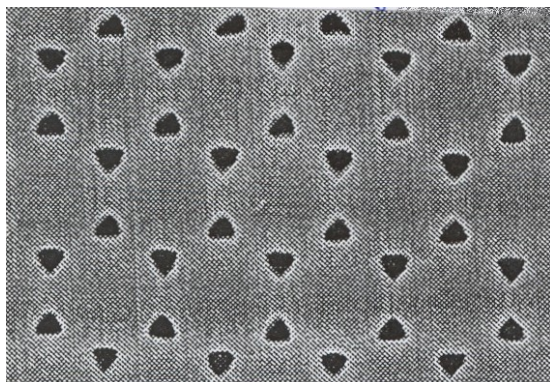


SiO<sub>2</sub> defekt periodične strukture

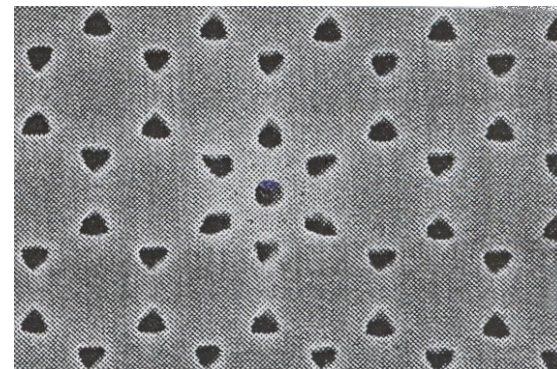


zračni defekt periodične strukture

- Heksagonalna regularna struktura in struktura z defektom

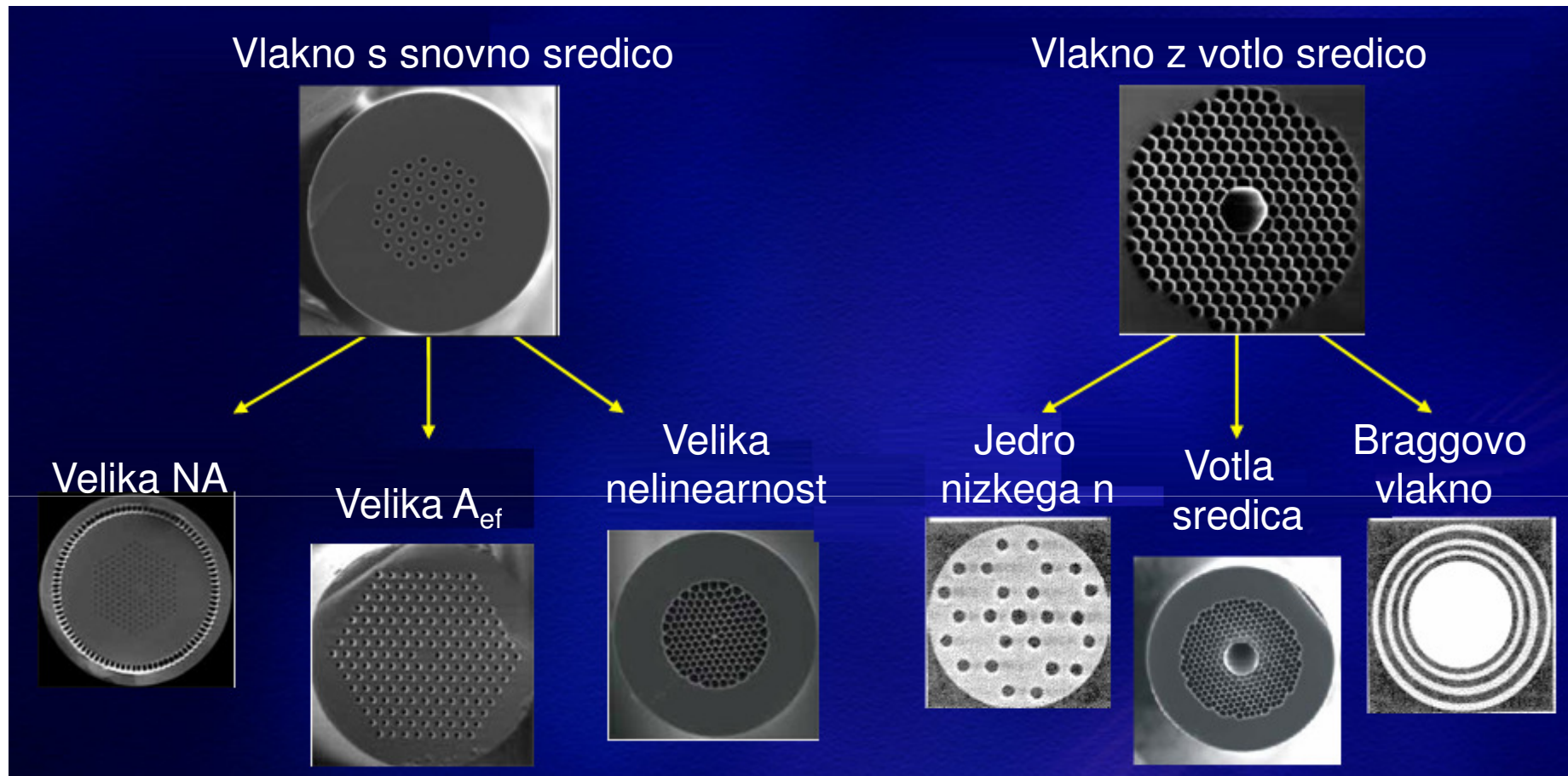


regularna periodična struktura



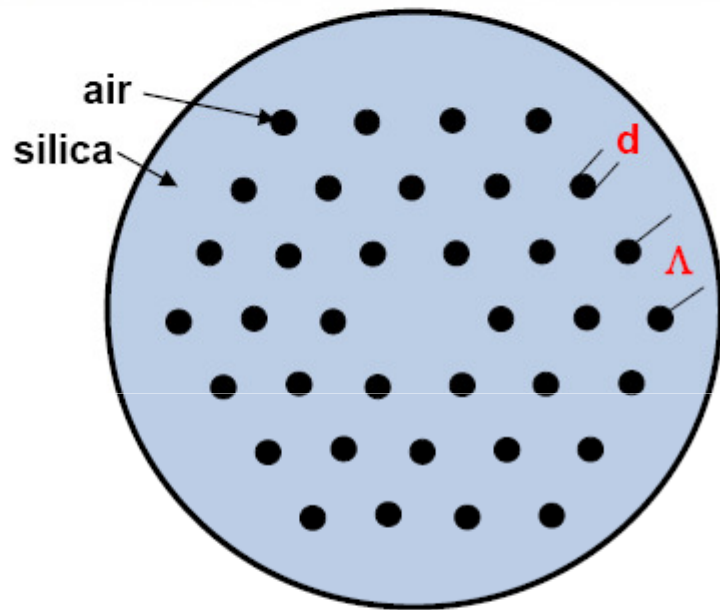
zračni defekt periodične strukture

# Lastnosti fotoničnih kristalnih vlaken<sup>11</sup>



- mikrostrukturirana vlakna – vlakna iz SiO<sub>2</sub> brez primesi
- vlakna z luknjičasto oblogo, nižji efektivni lomni količnik obloge
- fotonična kristalna vlakna, pasovno-zaporna obloga (band-gap)

# LMA microstructure single-mode fibers



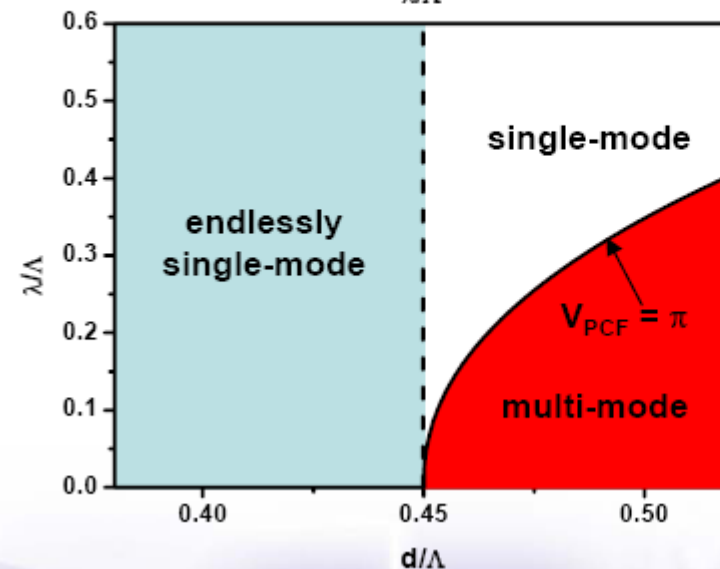
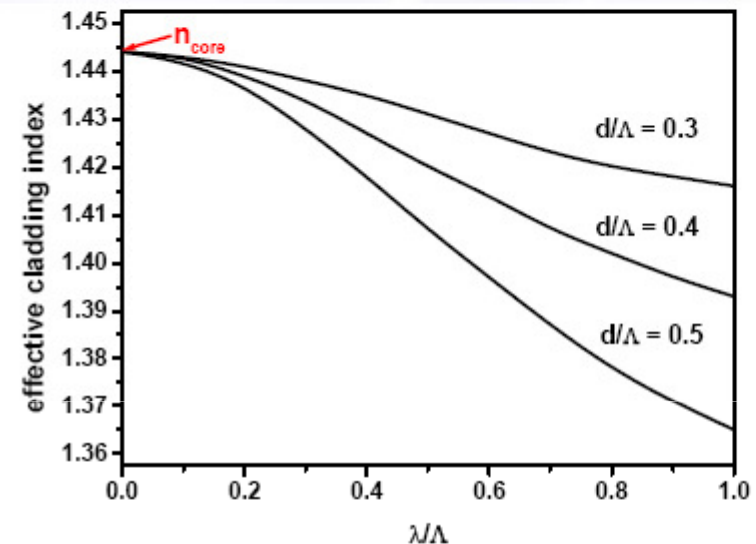
photonic crystal fiber

$$V_{PCF} = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \Lambda \cdot \sqrt{n_{core}^2(\lambda) - n_{cladding}^2(\lambda)}$$

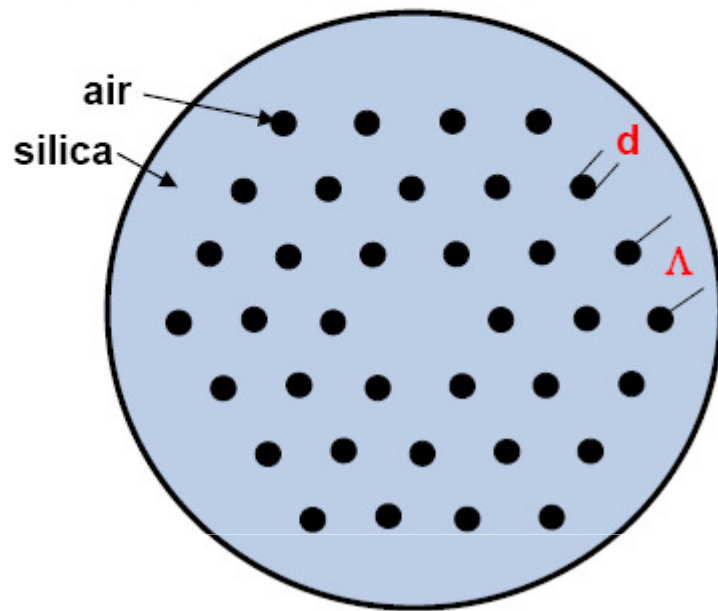
single-mode condition:  $V_{PCF} < \pi$

➔ large single-mode cores

➔ low nonlinearity



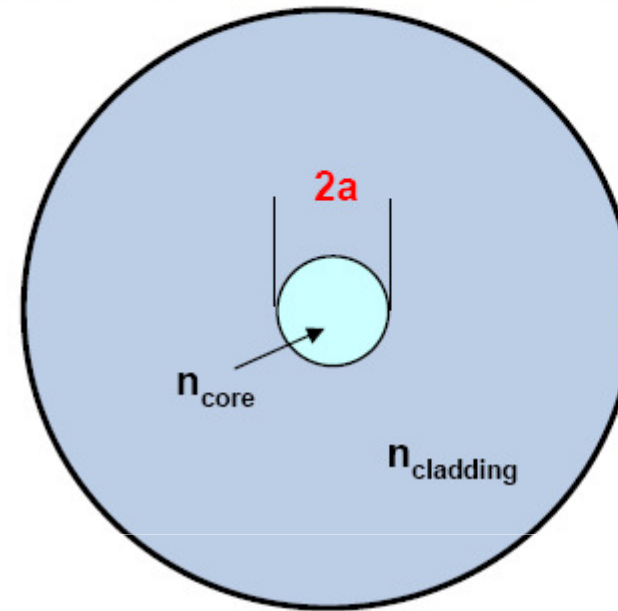
# LMA microstructure single-mode fibers



photonic crystal fiber

$$V_{PCF} = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \Lambda \cdot \sqrt{n_{core}^2(\lambda) - n_{cladding}^2(\lambda)}$$

single-mode condition:  $V_{PCF} < \pi$



step-index fiber

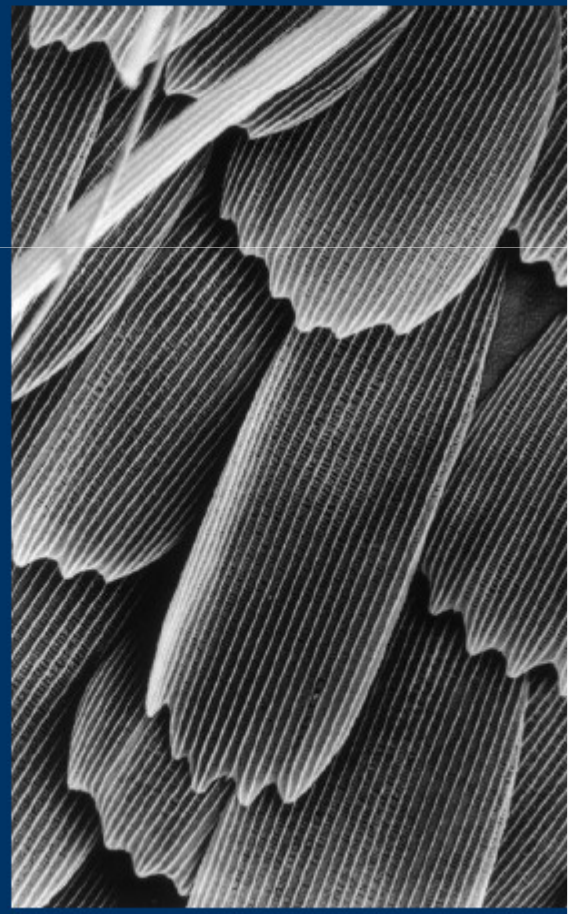
$$V_{SI} = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot a \cdot \sqrt{n_{core}^2 - n_{cladding}^2}$$

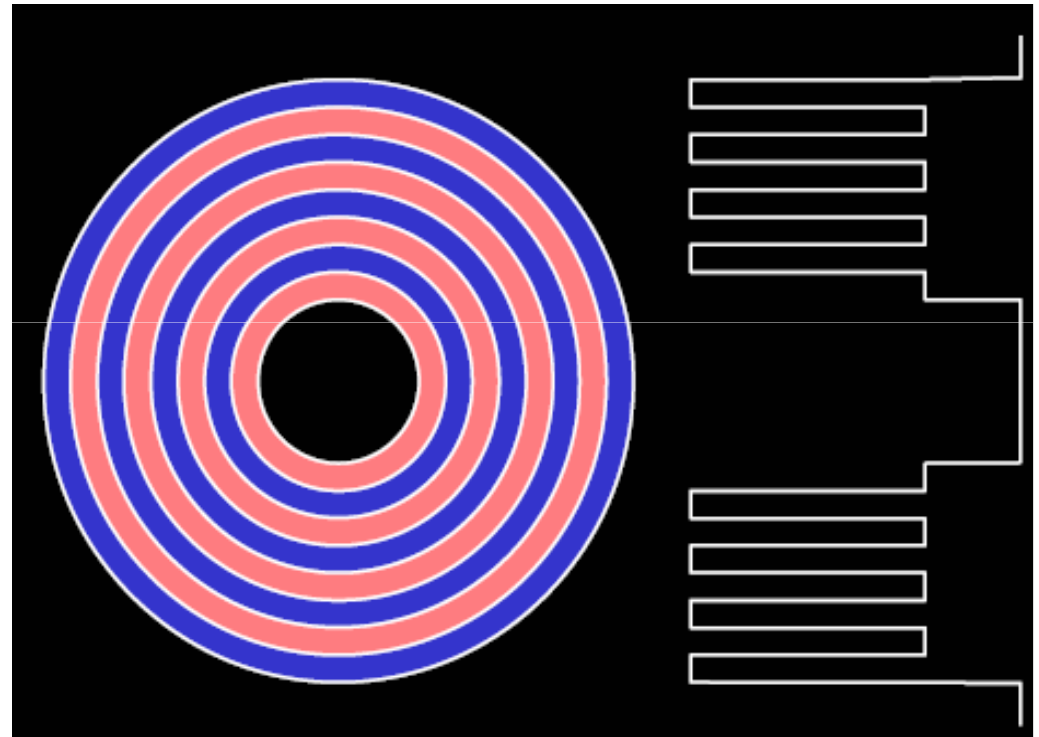
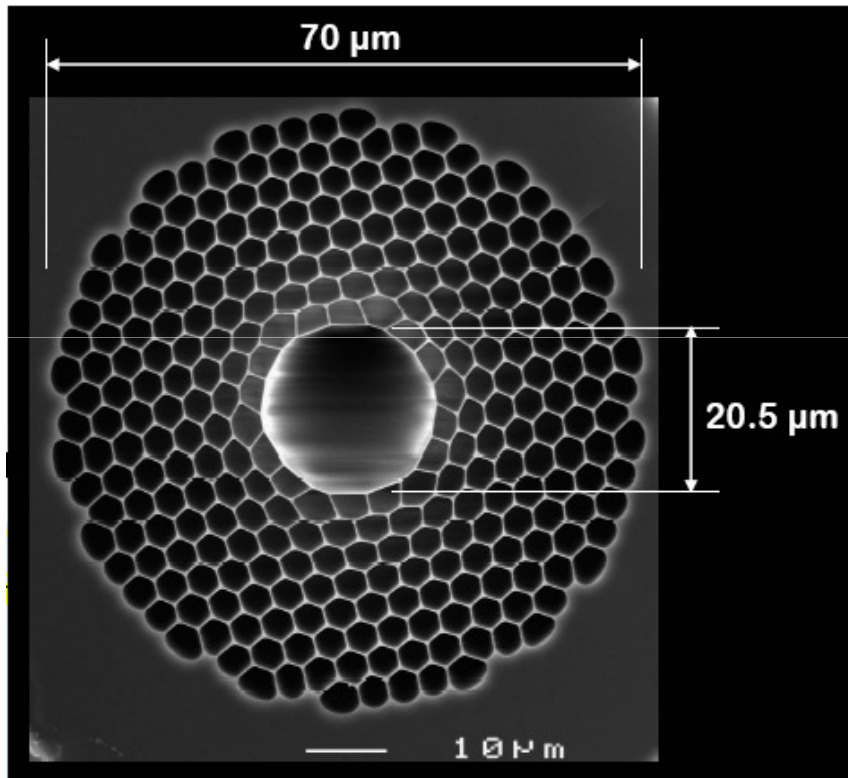
single-mode condition:  $V_{SI} < 2.405$

N.A. Mortensen, J.R. Folkenberg, M.D. Nielsen, and K.P. Hansen,  
 "Modal cut-off and the V-parameter in photonic crystal fibers",  
 Opt. Lett. 28, 1879 (2003).



# Photonic crystals?

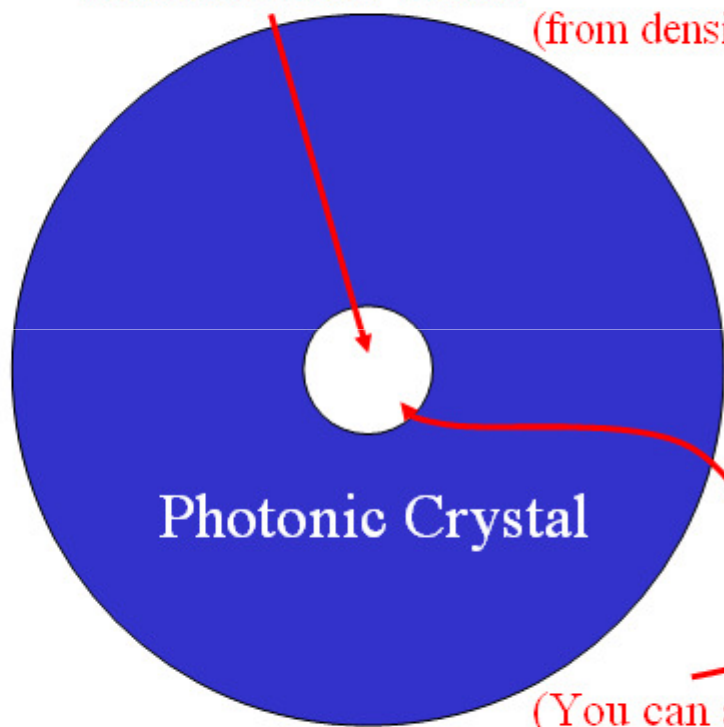




# Breaking the Glass Ceiling: Hollow-core Bandgap Fibers

1000x better  
loss/nonlinear limits

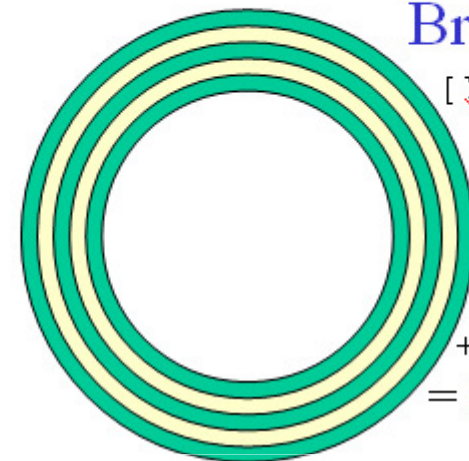
(from density)



Photonic Crystal

(You can also  
put stuff in here ...)

1d  
crystal

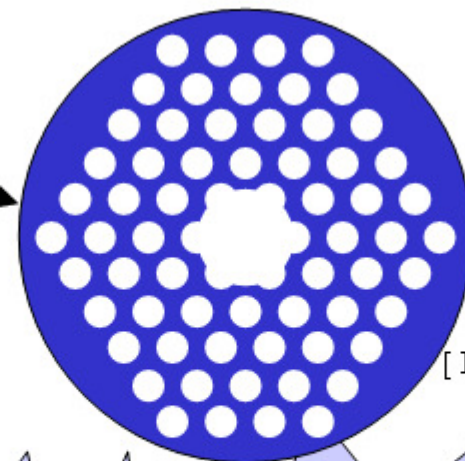


Bragg f

[ Yeh et al.,

+ omnidire  
= OmniC

2d  
crystal



PCF

[ Knight et al.



## 6. FOTONICNA KRISTALNA VLAKNA - pogoji valova

- Pogoj širjenja v snovi lomnega količnika  $n$

$$\beta \leq k_0 n \quad \text{neslabljen potujoči val}$$

- Pogoj za zaporo širjenja v snovi količnika  $n$

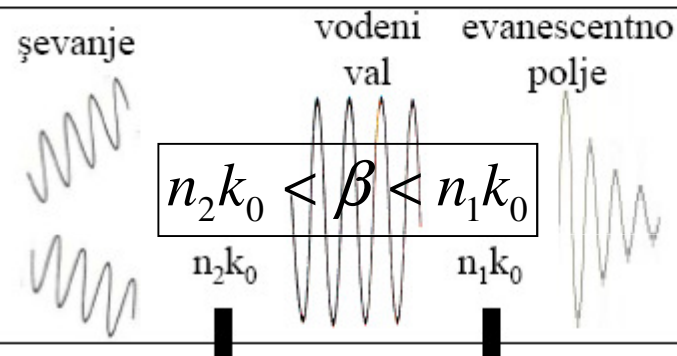
$$\beta > k_0 n \quad \text{evanescentni up}$$

- Pogoj širjenja vala v jedru običajnega vlakna ( $n_1, n_2$ )  $n_2 k_0 < \beta < n_1 k_0$   $n_2$  neodvisno

- $\beta < n_2 k_0$  sevanje v oblogo

- $n_2 k_0 < \beta < n_1 k_0$  širjenje

- $\beta > n_1 k_0$  slabljenje



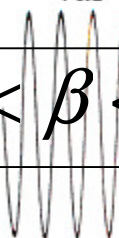
- Pogoj širjenja vala v snovnem jedru PCF ( $n_{SiO_2}, n_{ef}$ )  $n_{ef} k_0 < \beta < n_{SiO_2} k_0$   $n_{ef}$  odvisno

sevanje



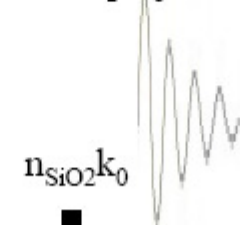
$n_{ef} k_0$

vodeni val



$$n_{ef} k_0 < \beta < n_{SiO_2} k_0$$

evanescentno polje



$n_{SiO_2} k_0$

# FOTONIČNA KRISTALNA VLAKNA - slabljenje

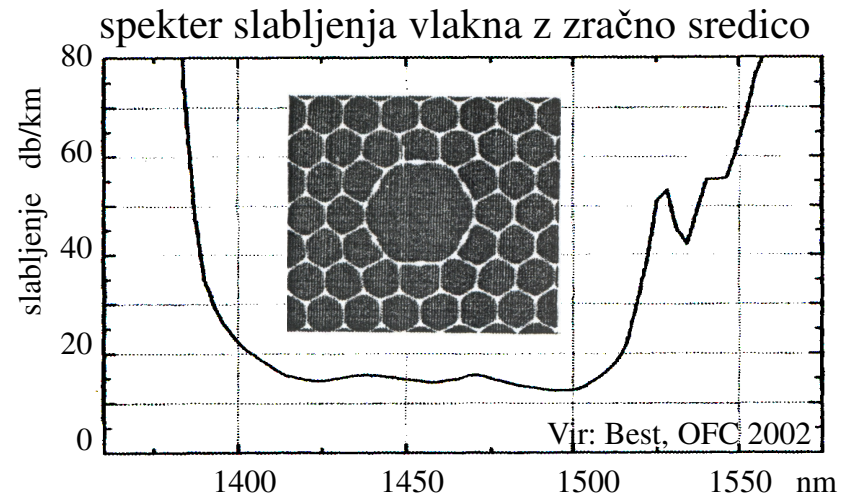
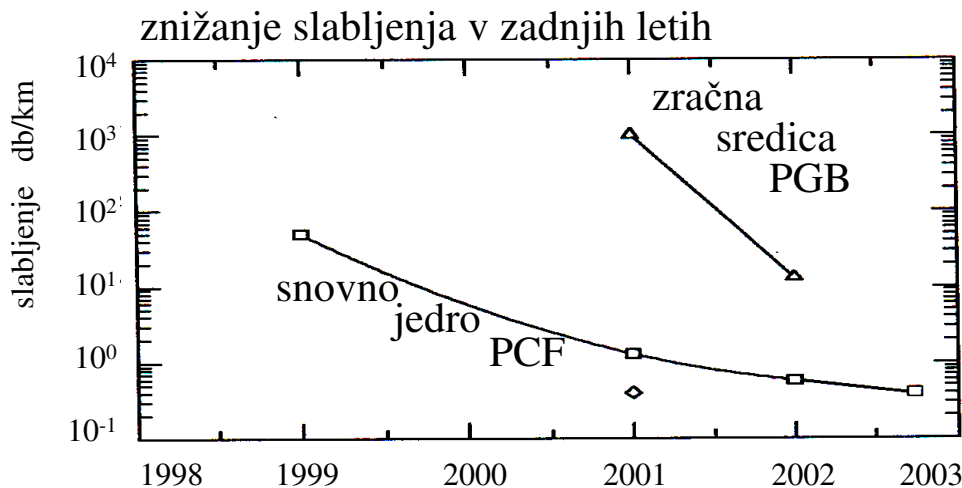
• Skupno slabljenje:  $\alpha = A/\lambda^4 + B + C$

• Anatomija slabljenja:

- $A/\lambda^4$  slabljenje zaradi Rayleighovega sipanja (0,18 dB/km)
- B slabljenj zaradi neregularnosti in drugih nepopolnosti strukture vlakna (0,007 dB/km)
- C slabljenje zaradi absorpcije v snovi (ioni OH, infrardeča absorpcija nečistoče) (0,13 dB/km)

• Skupno slabljenje pri  $\lambda = 1550$  nm, prikaz po letih:

običajno enorodovno vlakno		PCF - snovno jedro		PCF - zračna sredica	
< 1970	$\alpha > 1000$ dB / km	< 2000	$\alpha > 100$ dB / km	< 2000	$\alpha > 1000$ dB / km
1970	$\alpha = 17$ dB / km	2001	$\alpha = 2,6$ dB / km	2001	$\alpha = 100$ dB / km
1980	$\alpha = 0,2$ dB / km	2002	$\alpha = 0,58$ dB / km	2002	$\alpha = 13$ dB / km
1990	$\alpha = 0,16$ dB / km	2003	$\alpha = 0,37$ dB / km	teoretično	$\alpha < 0,2$ dB / km



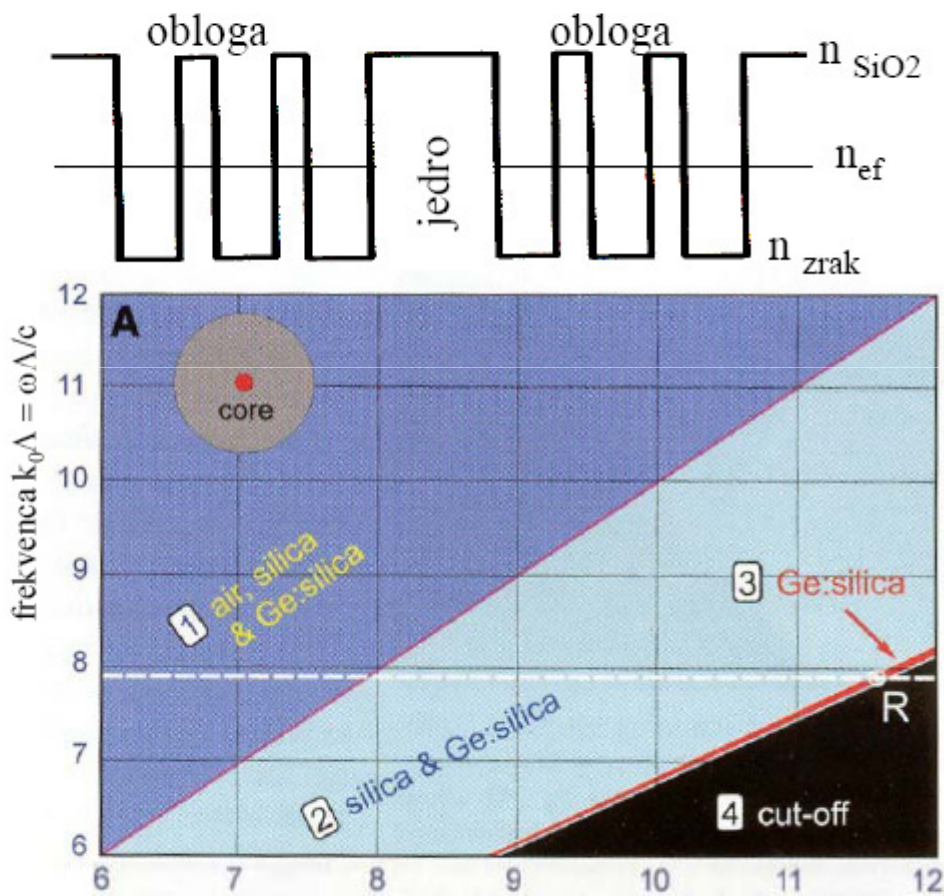
# 7. FOTONIČNA KRISTALNA VLAKNA - pasovno - zaporni mehanizem

## Vlakno s polno (snovno) sredico:

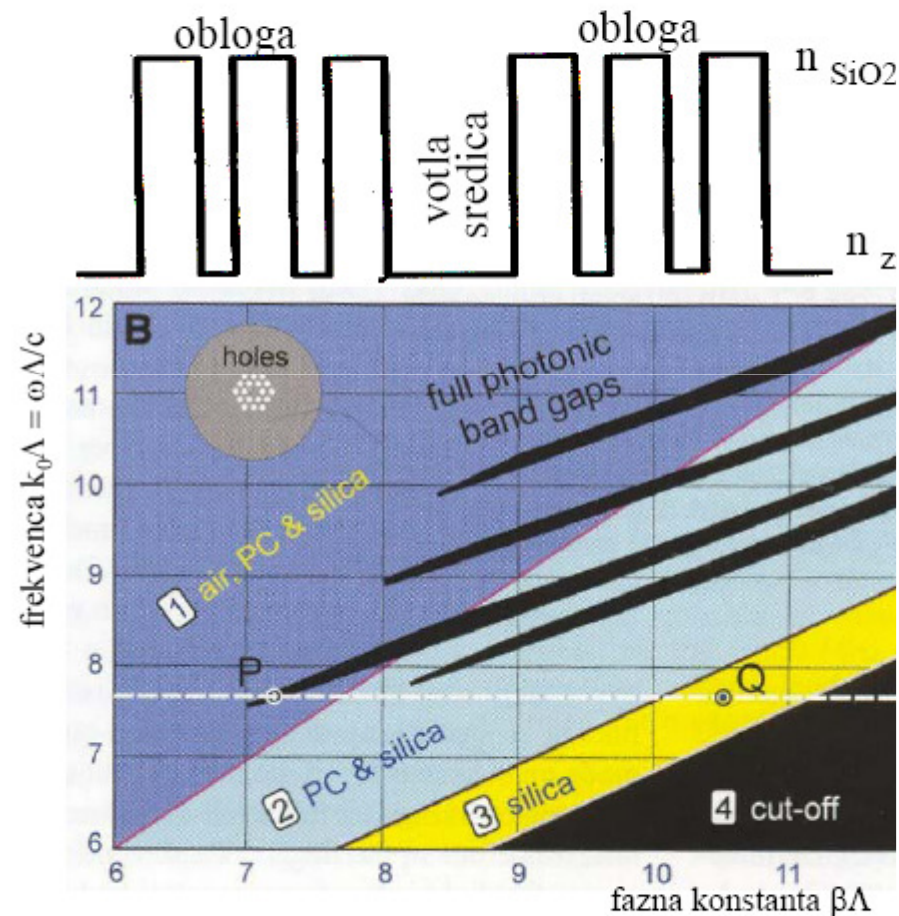
- efektivni lomni količnik jedra in obloge
- totalni odboj na meji dveh snovi velikega kontrasta

## Vlakno z votlo (zračno) sredico:

- prečna zapora na strogo periodični in zadosti razsežni strukturi periode  $\Lambda$
- reaktivni odboj na meji



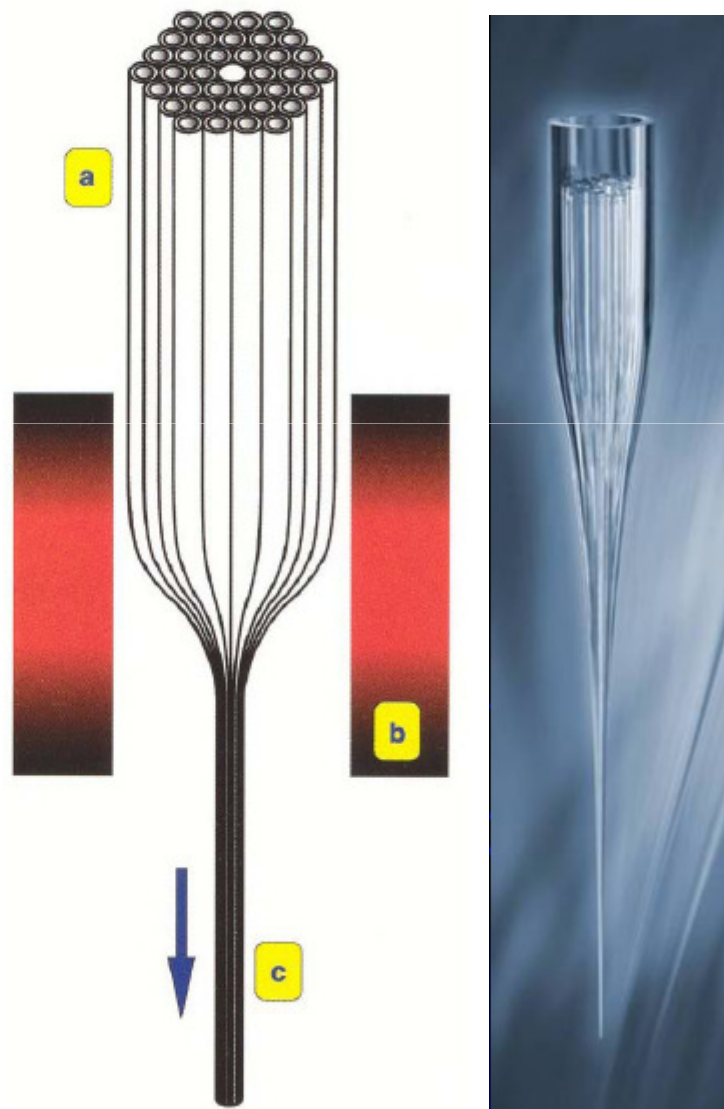
- 4 evanescentno polje  $\beta > k_1$
- 3 val v jedru  $k_2 < \beta < k_1$ , (R)
- 2 val v oblogi ( $n_0 < n_2 < n_1$ ),  $k_0 < \beta < k_2$



- 1 2 3 val v zraku, oblogi in snovnem jedru
- 1 val v zraku, zapora pri širjenju v oblo (P), pogoj za širjenje v zračni sredici (Q)

## 8. FOTONIČNA KRISTALNA VLAKNA - tehnologija

snop steklenih cevčic oz. paličic



**Postopki:**

### 1. Vlečenje snopa cevčic $\text{SiO}_2$ skozi pečico:

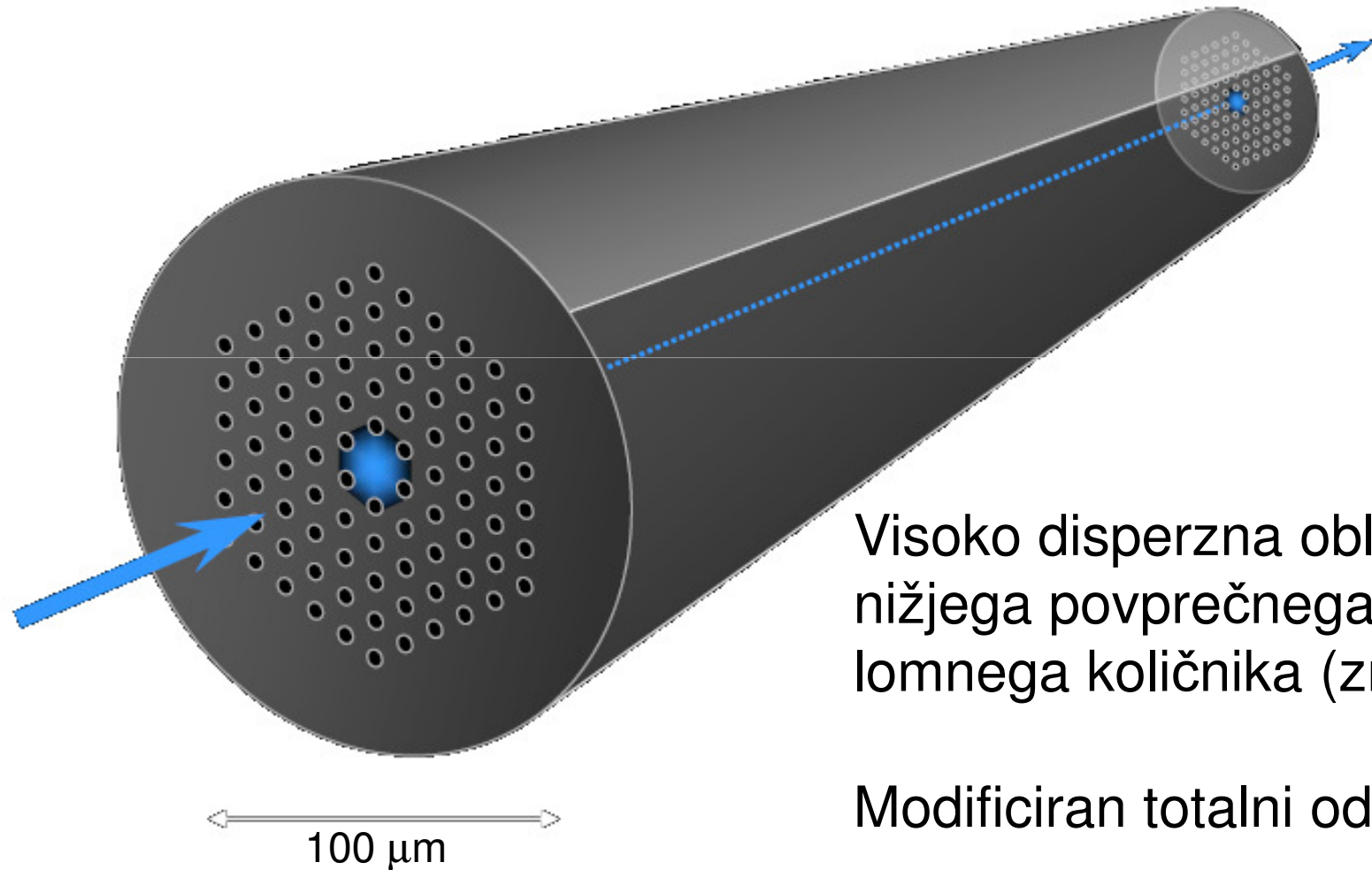
- zahtevna utečen postopek
- pomembna je pravilnost razporeditve cevčic v snopu in odstranitev nečistoč
- možnost vnosa primesi, npr. erbij
- kapilare 25 nm (25.000 kratna skrčitev), Guinnessova knjiga rekordov
- mozaično steklo v starem Egiptu?



### 2. Stiskanje raztaljenega materiala skozi matrico določene oblike:

- postopek primeren za nekatere materiale (kalkogenidi, polimeri)
- možnost izdelave zelo različnih struktur
- postopek je v razvoju

# Vlakno s snovno sredico in luknjičasto<sup>21</sup> (kapilarno) oblogo

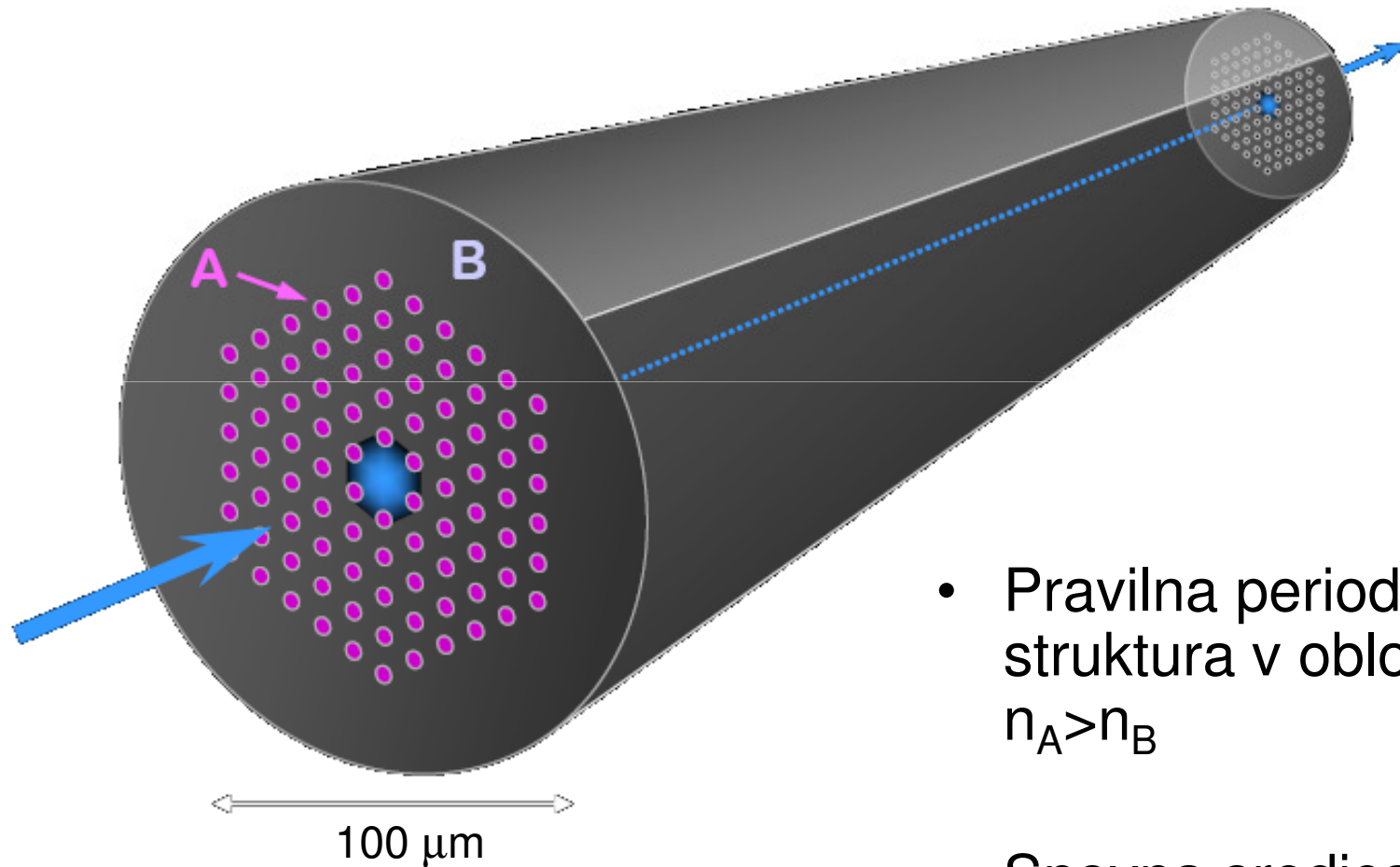


Visoko disperzna obloga  
nižjega povprečnega  
lomnega količnika (zrak)

Modificiran totalni odboj

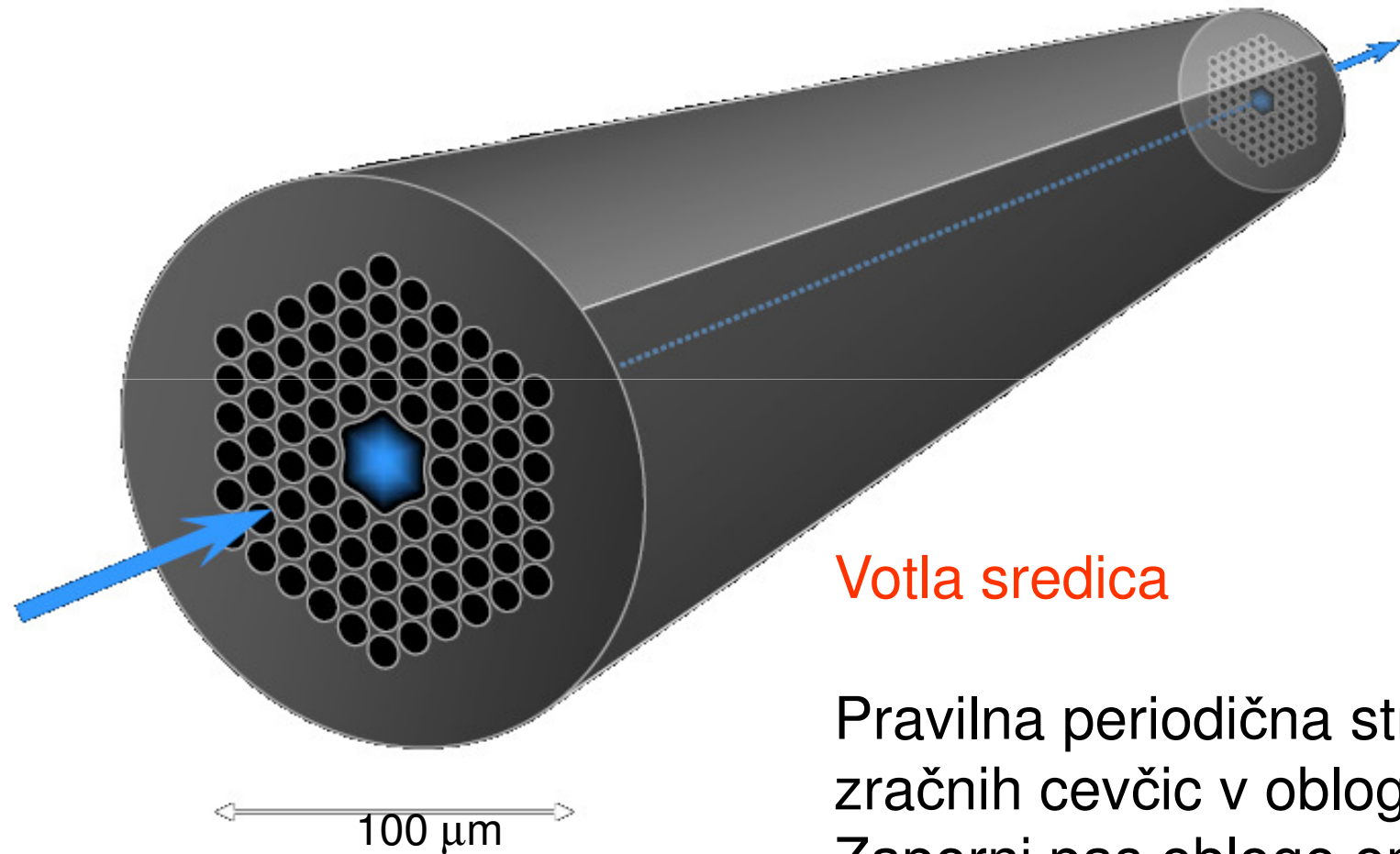
# Vlakno z osnovnim dielektrikom $\epsilon_{rB}$ in periodično strukturo $\epsilon_{rA}$ v oblogi

22



- Pravilna periodična struktura v oblogi  $n_A > n_B$
- Snovna sredica  $n_B$

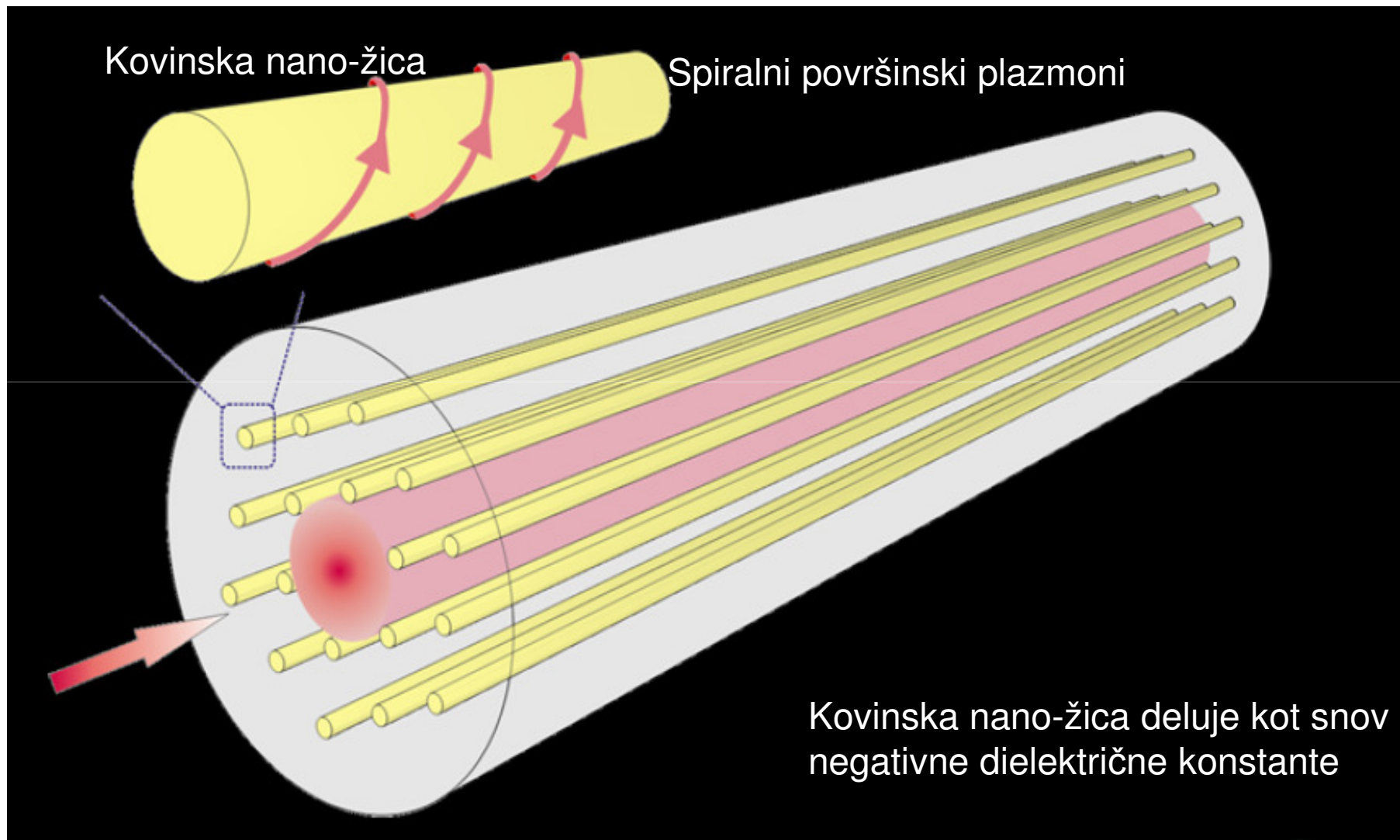
# Fotonično kristalno vlakno z votlo sredico HC PCF



Votla sredica

Pravilna periodična struktura zračnih cevčic v oblogi. Zaporni pas obloge omogoča vzdolžno širjenje.

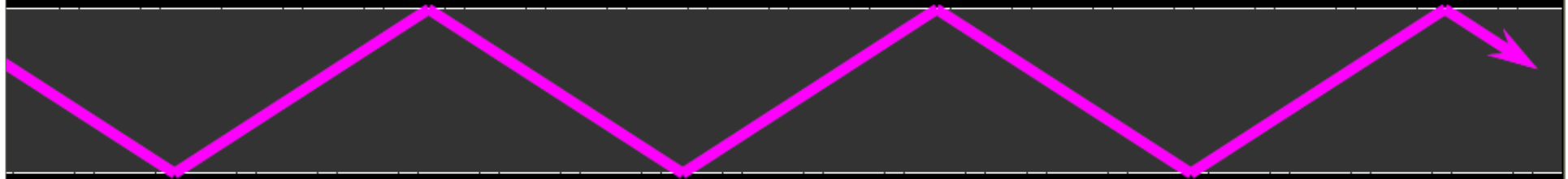
# Vlakno s kovinskimi nano-žicami v oblogi <sup>24</sup> - površinski plazmoni





# Odboji v votli sredici vlakna HC PCF <sup>25</sup>

Slabljenje 1 dB/km

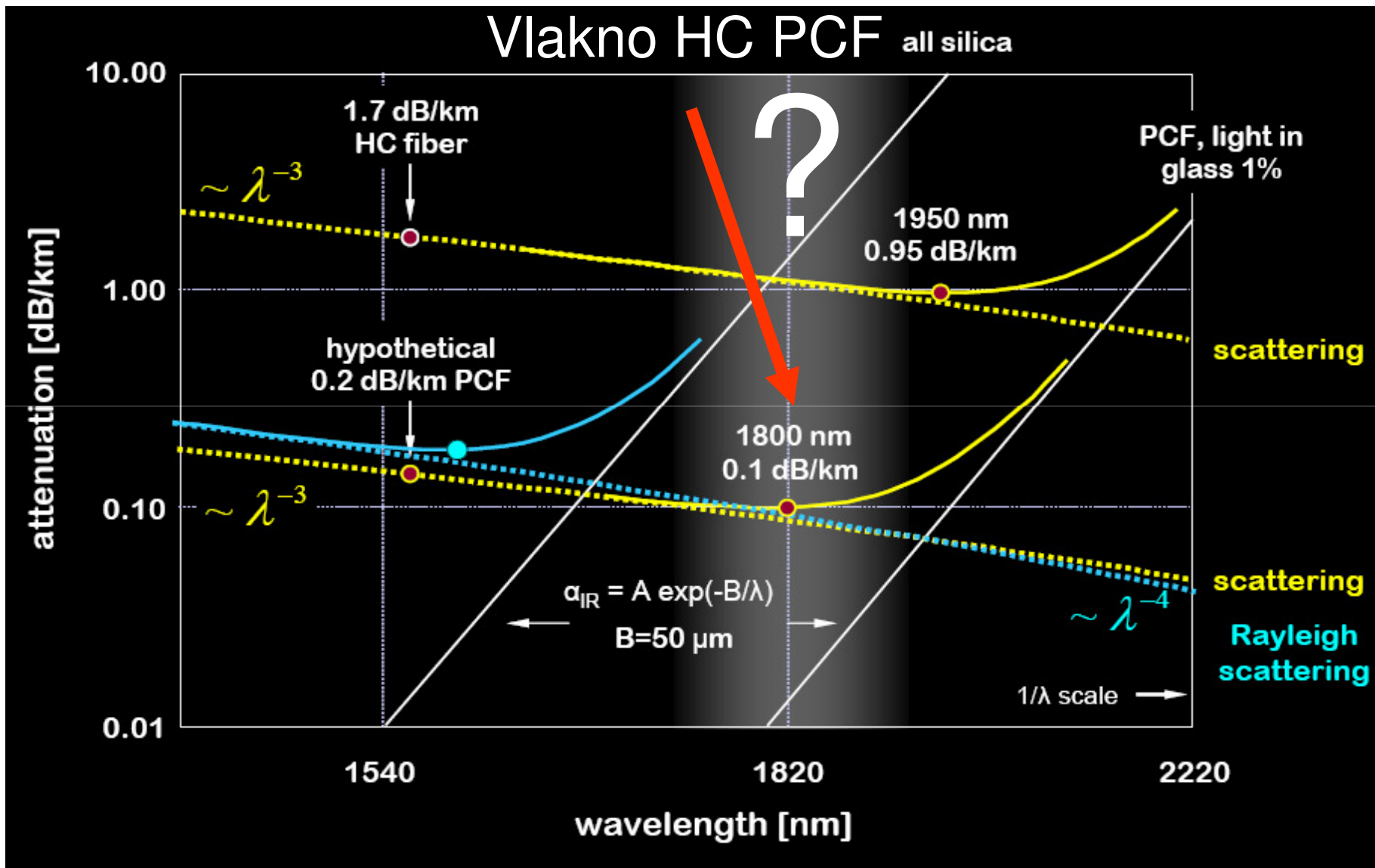


2,8 miliona odbojev na km dolžine vlakna (20 $\mu$ m sredica, 1550nm)

0,35  $\mu$ dB/odboj (odbojnost 0,999999992)

Glavni povzročitelj slabljenja je razprševanje na neregularnostih stene votle sredice

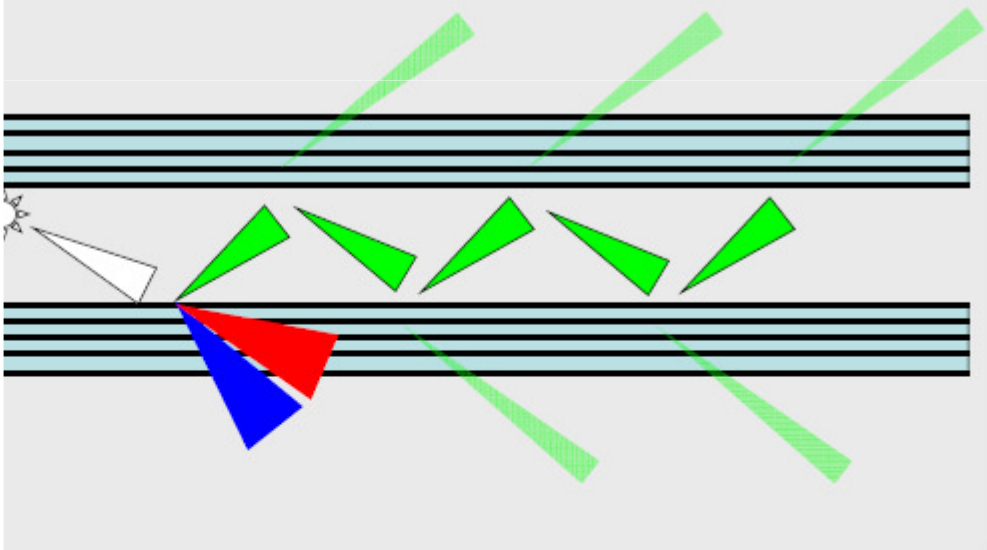
# Novo telekomunikacijsko okno 1800 nm



# KONEC

ÉCOLE POLYTECHNIQUE MONTREAL Poly Photonique

## Photonic Bandgap fibers are spectral filters



ÉCOLE POLYTECHNIQUE MONTREAL Poly Photonique

## Bragg shift due to fiber elongation applications in sensing of strain

