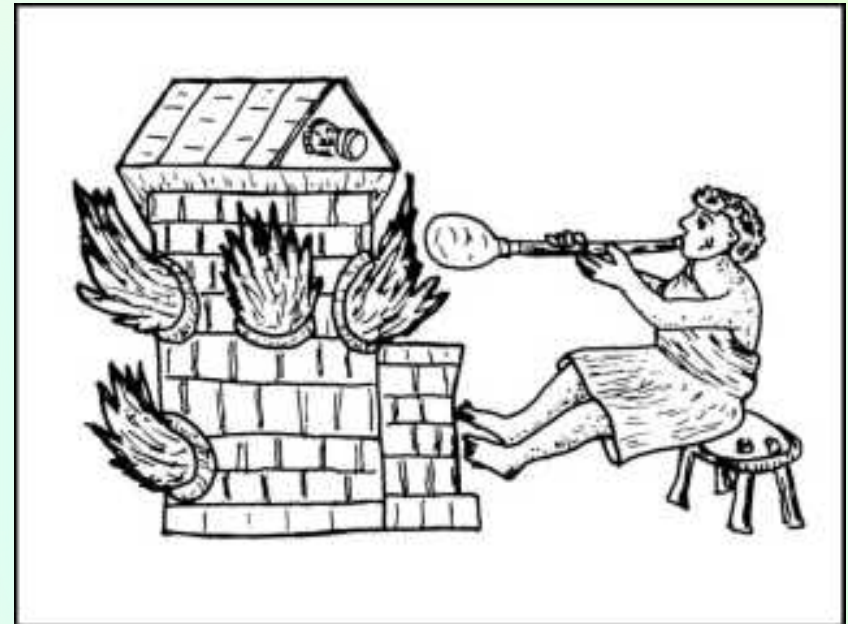


# Struktury $\Delta n$

optyka zintegrowana w fotonice

Maciej Urbaniak



źródło: Wikimedia Commons (Wikimedia)

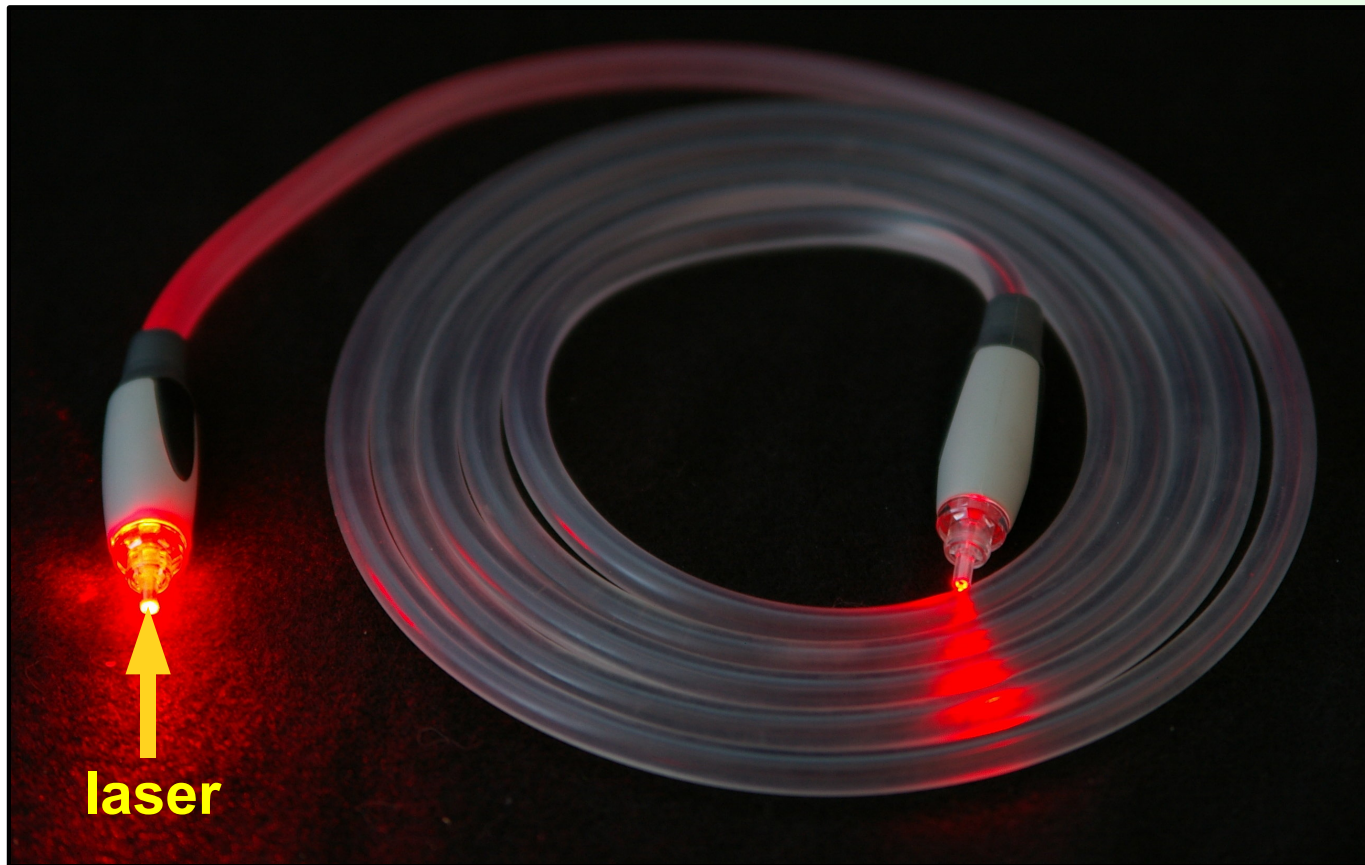
Hrabanus Maurus De universo, r. 1023

# Struktury $\Delta n$

## optyka zintegrowana w fotonice

- Fotonika, falowody optyczne
- Szkła fotomodyfikowalne
- Struktury  $\Delta n$  – optyka zintegrowana

**Photonics** can be defined as the utilization of solid state materials for the generation (electrical-to-optical conversion), guidance, control, and detection (optical-to-electrical conversion) of light to communicate information over distance. [1]



źródło: autor Hustvedt, Wikimedia Commons (Wikimedia)

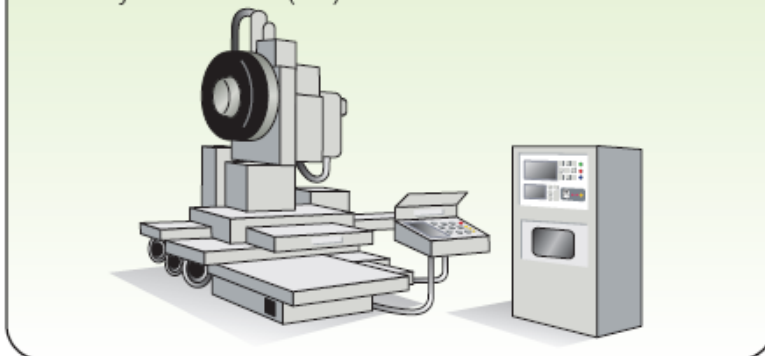
Falowód Toslink®

$\lambda \approx 650\text{nm}$

## Application examples of TOSLINK

TOSLINK is used in a wide variety of applications, such as digital audio and factory automation.

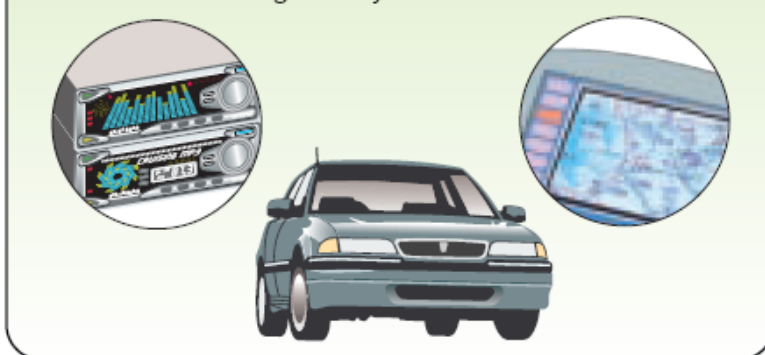
Factory automation (FA)



Digital audio



Car audio and navigation system

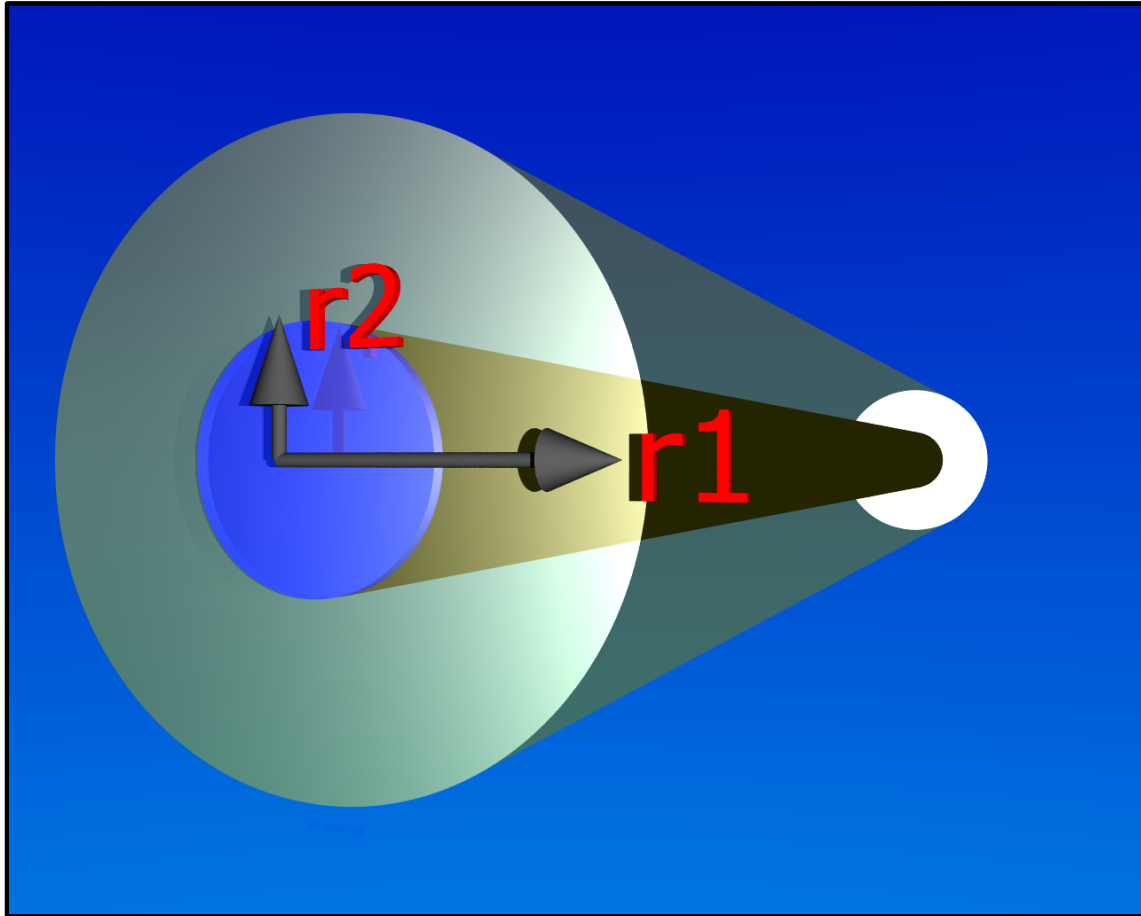


Office automation (OA)



Zalety falowodów optycznych:

- szum elektromagnetyczny nie wpływa na transmisję
- linia przesyłowa nie zakłóca transmisji w liniach sąsiednich



Typowy falowód optyczny:

- $\text{SiO}_2$  główny składnik rdzenia
- straty transmisyjne rzędu 0.2dB/km (intensywność maleje dwukrotnie po 15km)
- płaszcz otoczony jest zwykle powłoką ochronną (ok. 0.25mm)
- transmisja do około 14Tbit/s [13]

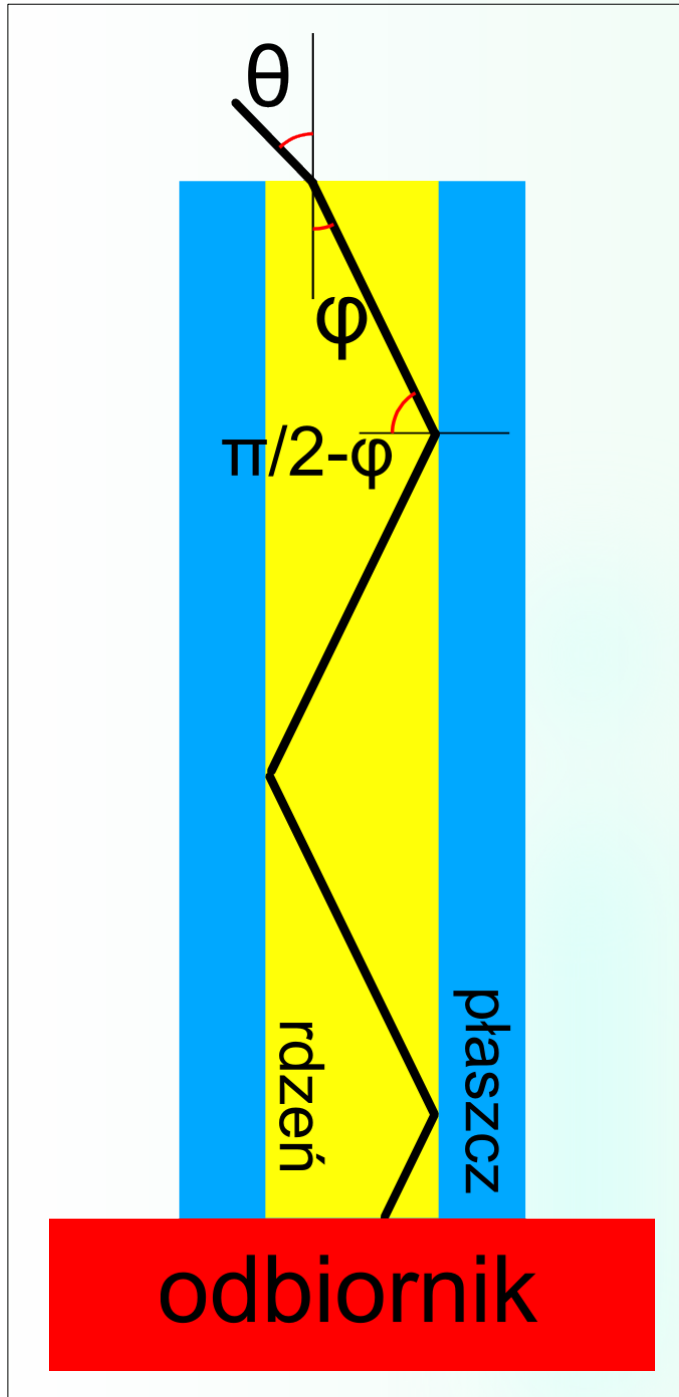
$$n_{rdzenia} > n_{płaszcz}$$

$r < r_2$  - rdzeń ( $r_2 \approx 10\mu\text{m}$ )

$r_2 < r < r_1$  - płaszcz

$$n = \frac{c}{v} = \sqrt{\epsilon_r \mu_r}$$

# Falowody - kąt graniczny



$$\frac{\sin \theta}{\sin \phi} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

*prawo Snelliusa*

Całkowite wewnętrzne odbicie na granicy rdzeń-płaszcz:

$$\frac{\sin(\pi/2 - \phi)}{\sin(\pi/2)} = \frac{n_{płaszcz}}{n_{rdzeń}}$$

Wiązka prowadzona w falowodzie(guided):

$$\sin(\pi/2 - \phi) n_{rdzeń} \geq n_{płaszcz}$$

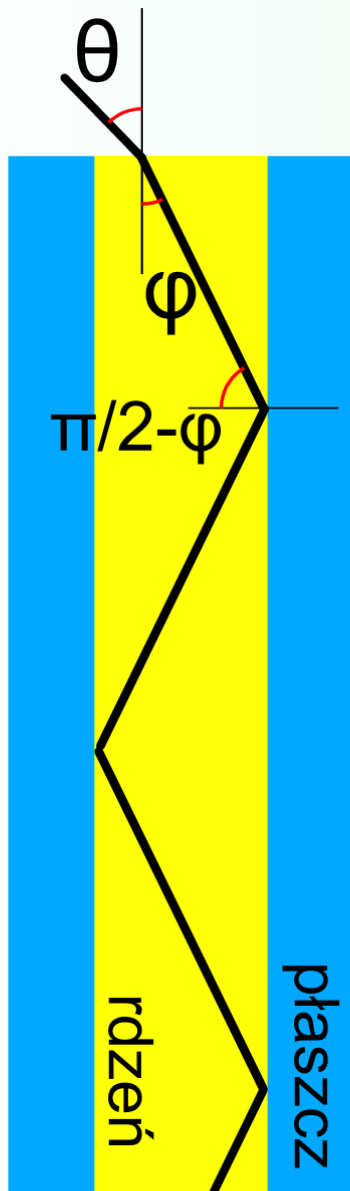
$$\sin(\pi/2 - \phi) = \cos(\phi)$$

$$\cos \phi n_{rdzeń} \geq n_{płaszcz}$$

$$\frac{\sin \theta}{\sin \phi} = \frac{n_{rdzeń}}{n_{powietrze}} = n_{rdzeń}$$

$$\sin \theta \leq \sqrt{n_{rdzeń}^2 - n_{płaszcz}^2}$$

## Falowody - kąt graniczny



odbiornik

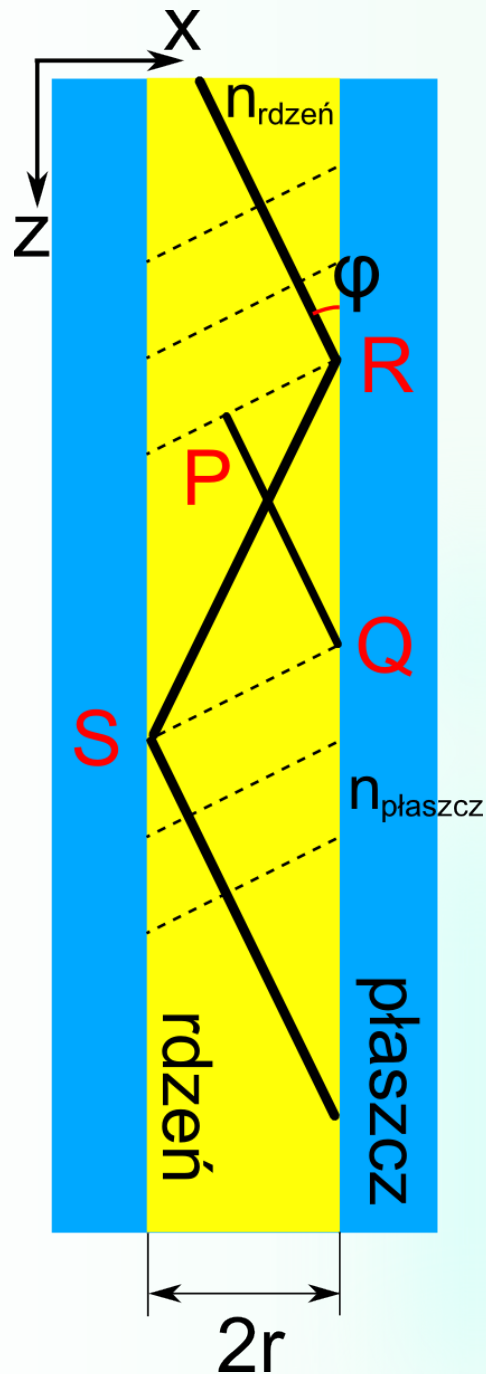
Typowe wartości ( $\Delta n = n_{\text{rdzeń}} - n_{\text{płaszcz}}$ ) są rzędu **0.01!**

Odpowiada to typowo  $\theta_{\text{max}} \approx 10^\circ$

Promienie spełniające poniższy warunek nie są wypromieniowywane poprzez płaszcz falowodu

$$\sin \theta \leq \sqrt{n_{\text{rdzeń}}^2 - n_{\text{płaszcz}}^2}$$

# Falowody – propagowane mody



Ze względu na efekty interferencyjne w falowodzie mogą rozchodzić się tylko promienie o dyskretnych wartościach kąta  $\varphi$  (mody).

Różnica dróg optycznych **RS - PQ** musi być wielokrotnością długości fali w rdzeniu ( $\lambda_{próżnia}/n_{rdzeń}$ ).

$$(k_{próżnia} n_{rdzeń} l_{R-S} + 2 \Delta_{Goos-Hänchen}) - k n_{rdzeń} l_{P-Q} = 2m \pi$$

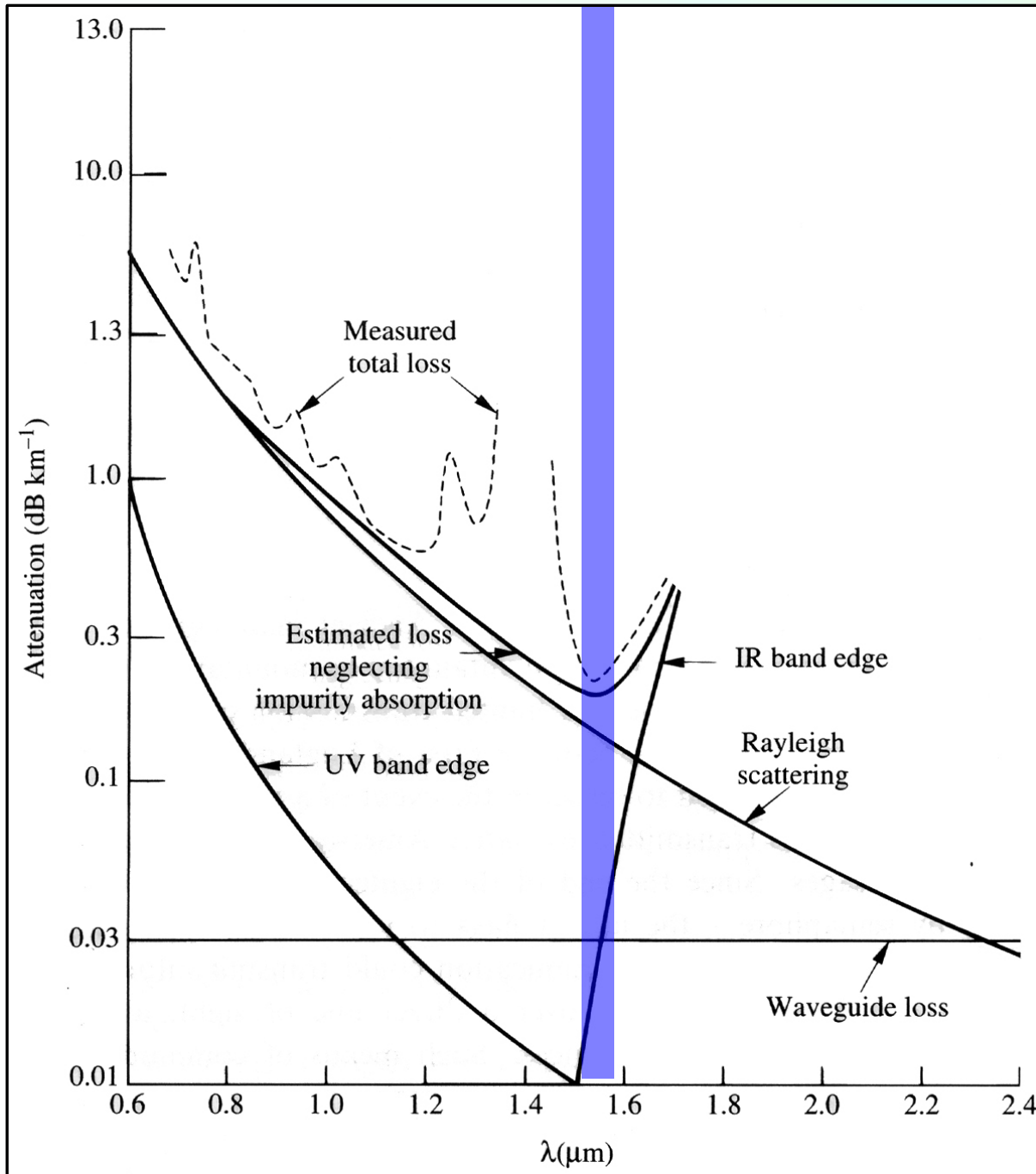
↑  
Zmiana fazy w wyniku całkowitego odbicia (punkty **S** i **R**)

Stosowana długość fali ( $\lambda_{próżnia}$ ) określa liczbę modów rozchodzących się w falowodzie

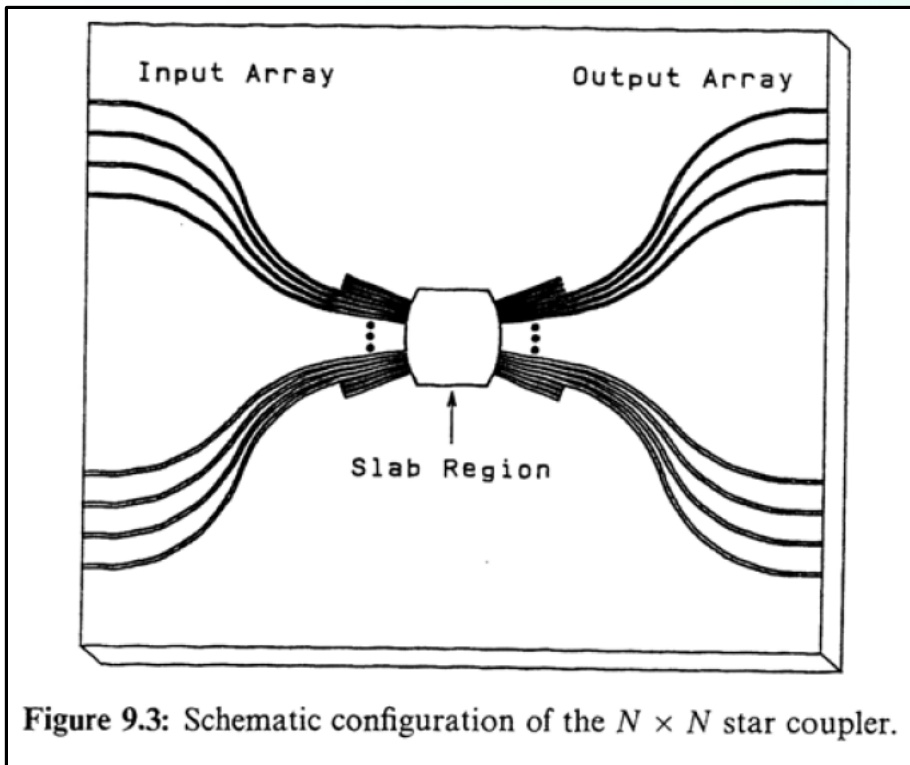
**W optyce zintegrowanej stosuje się głównie falowody płaskie**



# Falowody – trzecie okno



**trzecie okno** - straty rzędu  $0.2\text{dB/km}$

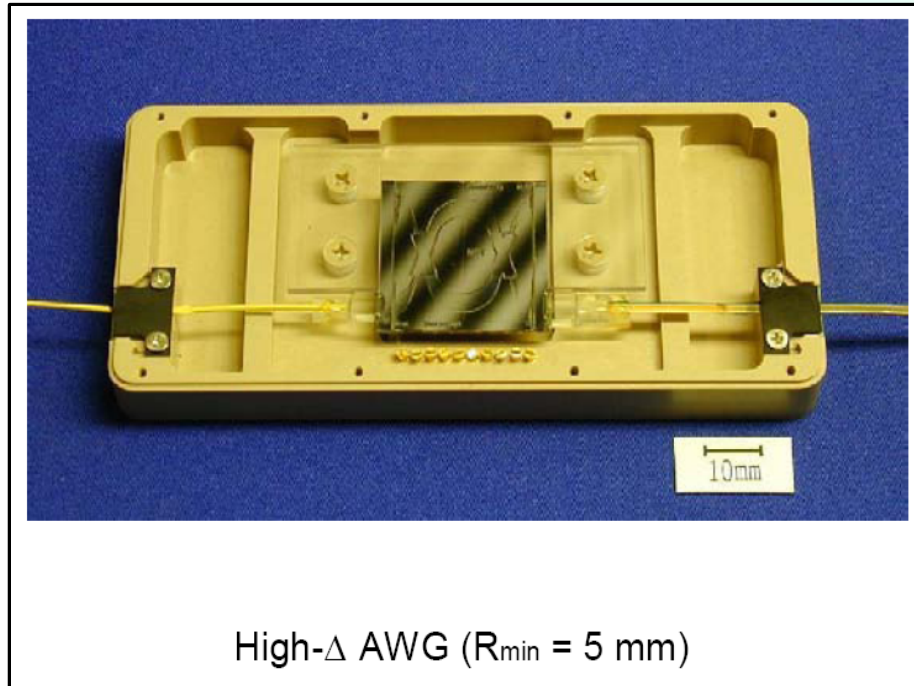


We współczesnej telekomunikacji na duże odległości informacja przekazywana jest głównie falowodami optycznymi:

- duża przepustowość
- odporność na zakłócenia
- utrudnione podsłuchiwanie

Lokalnie informacja przekazywana jest jednak głównie za pośrednictwem sygnałów **elektrycznych**.

Optyka zintegrowana ma pozwolić na ominięcie elektrycznej ścieżki przetwarzania informacji. W tym celu konieczna jest możliwość tworzenia układów optycznych o wysokim stopniu integracji.



<http://ccms.ntu.edu.tw/~dwhuang/courses/optwg/supp-1.pdf>

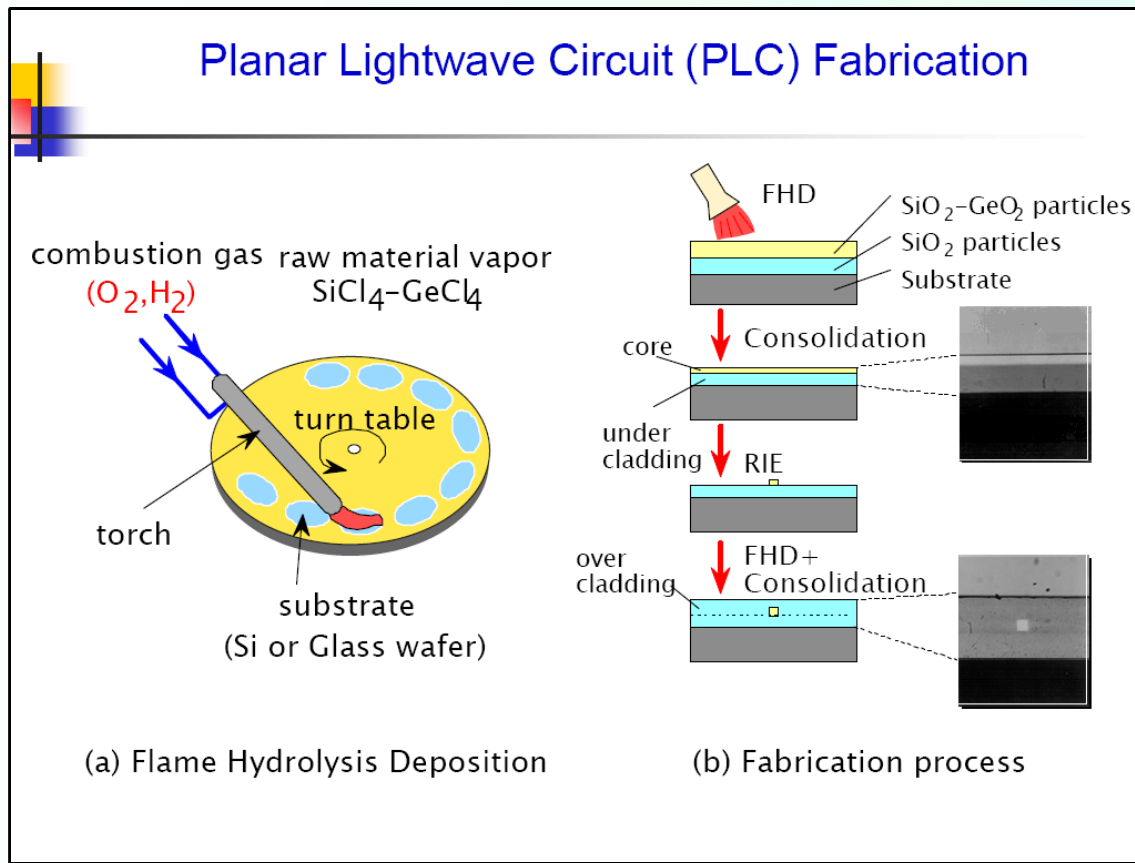
We współczesnej telekomunikacji na duże odległości informacja przekazywana jest głównie falowodami optycznymi:

- duża przepustowość
- odporność na zakłócenia
- utrudnione podsłuchiwanie

Lokalnie informacja przekazywana jest jednak głównie za pośrednictwem sygnałów **elektrycznych**.

Komercyjne układy optyki zintegrowanej dostępne są na rynku od **1994** roku - AWG (arrayed waveguide gratings - zwiększanie pojemności falowodu poprzez zastosowanie wielu częstotliwości)

# Optyka zintegrowana – wytwarzanie falowodów

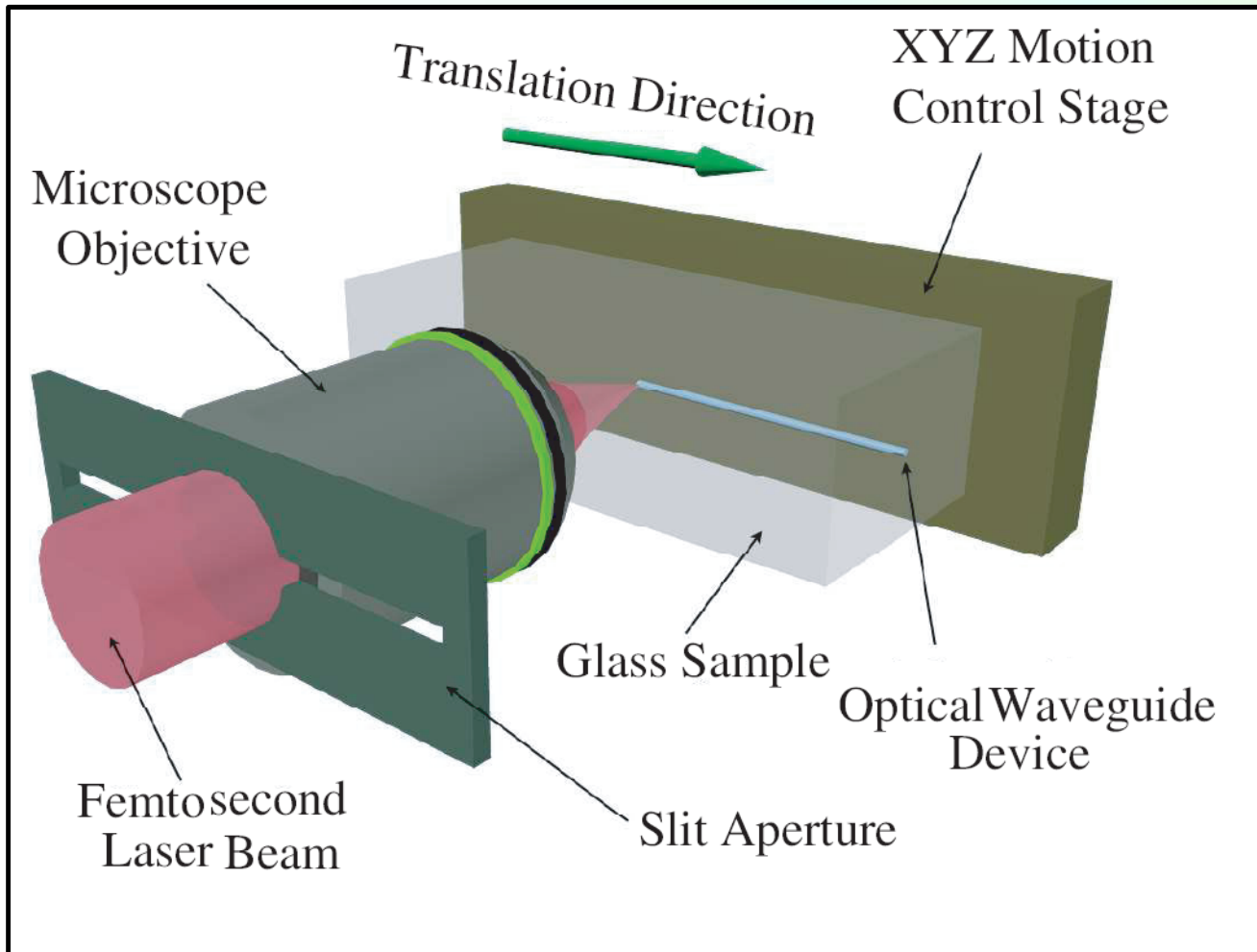


Początkowe metody produkcji falowodów planarnych (lata 80-te ubiegłego wieku) polegały na stosowaniu tylko procesów litografii.

Nie tworząno układów 3D.

- naniesienie płaszczu (undercladding)
- naniesienie rdzenia
- termiczna konsolidacja
- litografia
- naniesienie płaszczu (overcladding)
- termiczna konsolidacja

# Optyka zintegrowana – wytwarzanie falowodów



Do wytwarzanie zagłębionych struktur 3D wykorzystuje się wiązki lasera:

- 100 fs
- 1-10  $\mu\text{J}$
- powierzchnia plamki ( $\approx 10^{-7} \text{ cm}^2$ )
- **$10^{14} \text{ W/cm}^2$**

W naświetlonym obszarze zmianie ulegają m.in. własności optyczne (**współczynnik załamania  $n$** ).

- wiązka lasera ( $\lambda \approx 800 \text{ nm}$ ) tworzy falowód w materiale wyjściowym (wytwarzanie struktur 3D w **jednym** procesie – w przeciwieństwie do metod z lat 80-tych)

# Szkła fotomodyfikowalne

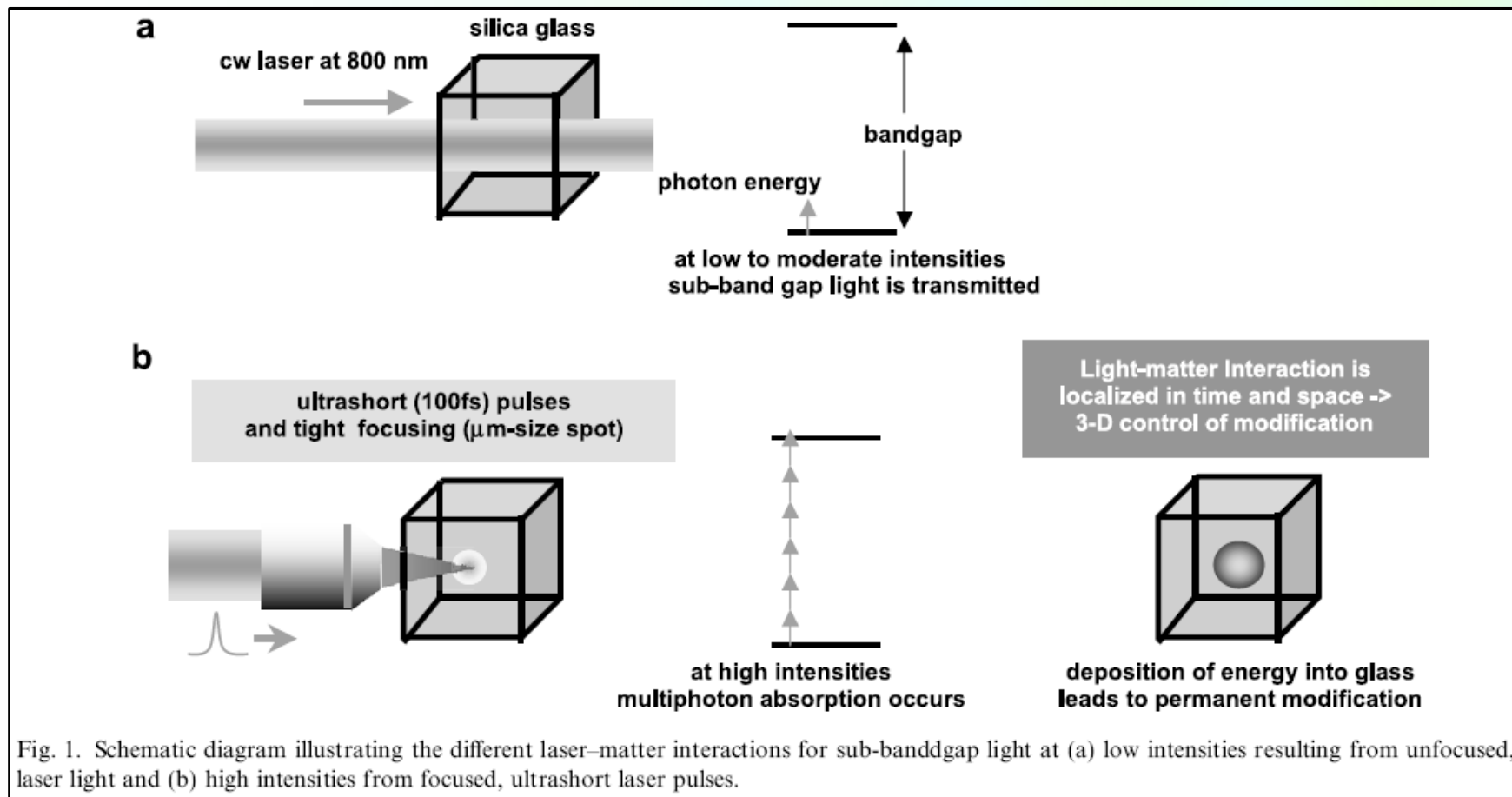


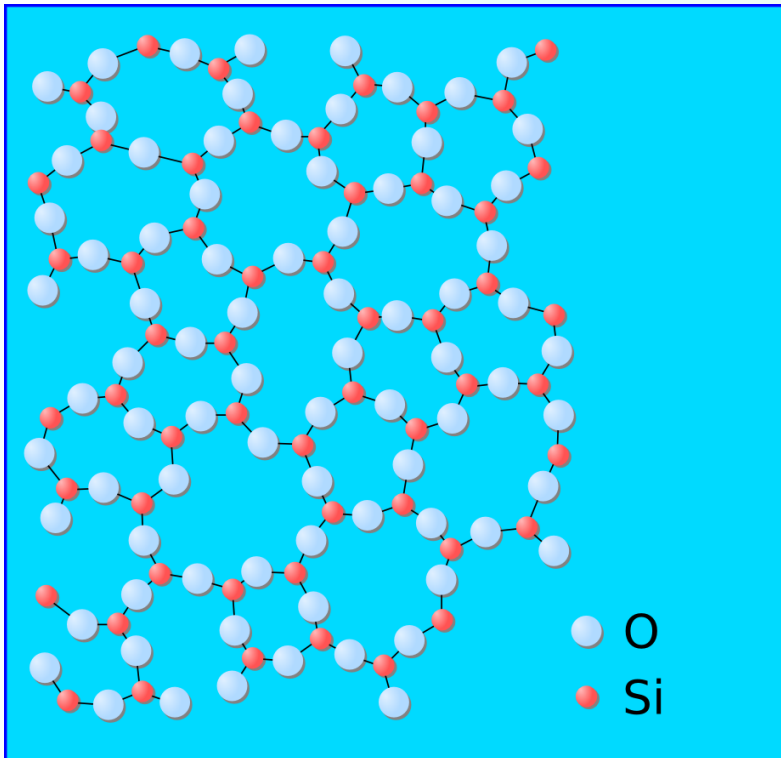
Fig. 1. Schematic diagram illustrating the different laser-matter interactions for sub-bandgap light at (a) low intensities resulting from unfocused, laser light and (b) high intensities from focused, ultrashort laser pulses.

Modyfikacja szkła za pomocą wiązki światła związana jest z efektami nieliniowymi. Dla dużej gęstości wiązki występuje **absorpcja wielofotonowa**. **Zmiany występują tylko w ograniczonym obszarze** -objętość ogniskowa.

# Szklą fotomodyfikowalne

Szklą wykorzystywane w pisaniu światłowodów:

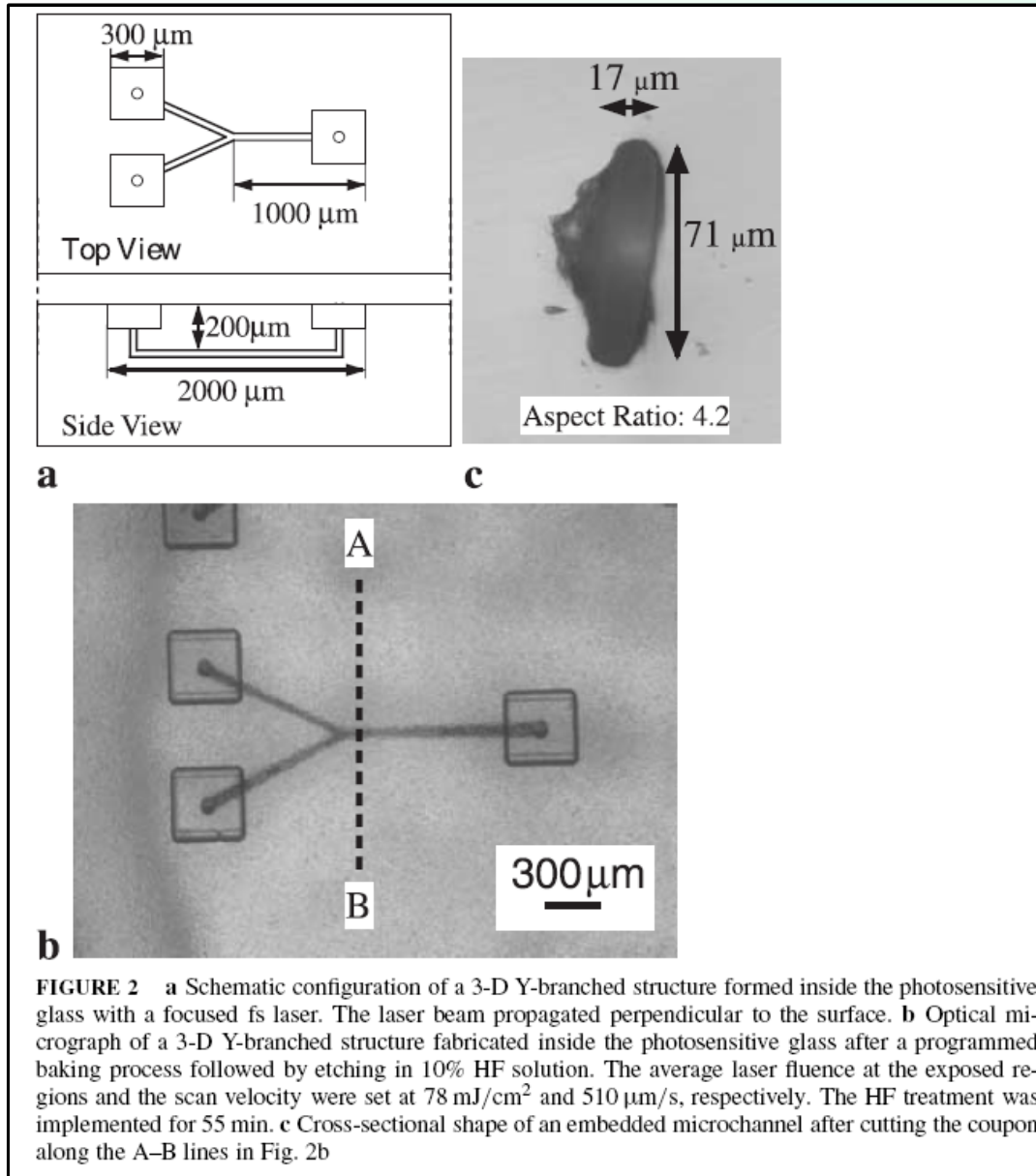
- $\text{SiO}_2$  (szklą kwarcowe)
- szklą fluorowe (Heavy metal fluoride glasses [HMFG])
- szklą borowe (niski współczynnik rozszerzalności cieplnej)
- szklą chalkogenowe
- szklą fosforowe



Wikimedia Commons (commons.wikimedia.org)  
Silica.svg (autor: Jdrewitt)

W szkle kwarcowym dominują pierścienie pięcio- i sześciokrotne

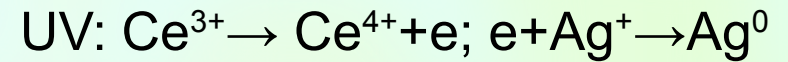
# Szklą fotomodyfikowalne



M. Masuda *et al.*, Appl. Phys. A 76, 857–860 (2003)

W szkle Foturan\* (domieszkowany Li-Al<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub>) możliwe jest tworzenie pustych mikrokanałów:

- Naświetlanie:

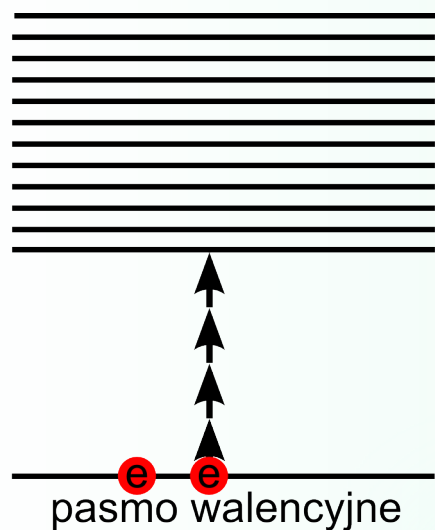


- wygrzewanie – klasteryzacja Ag i krystalizacja

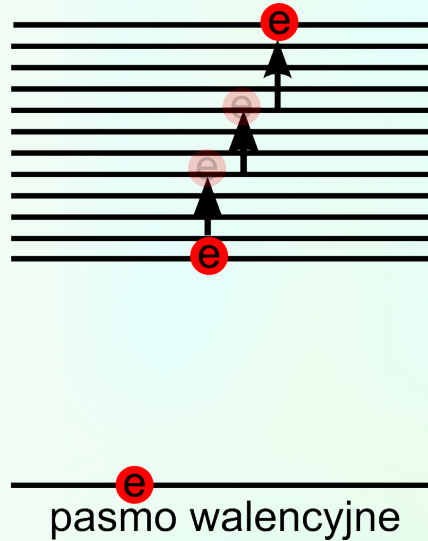
- wytrawianie kanałów – 10% HF



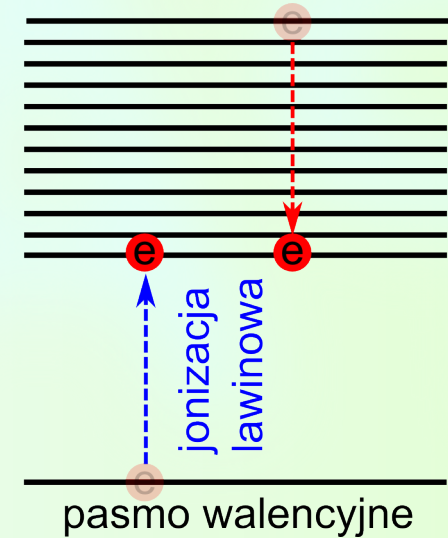
# Szkła fotomodyfikowalne – mechanizm modyfikacji



absorpcja wielofotonowa



absorpcja jednofotonowa

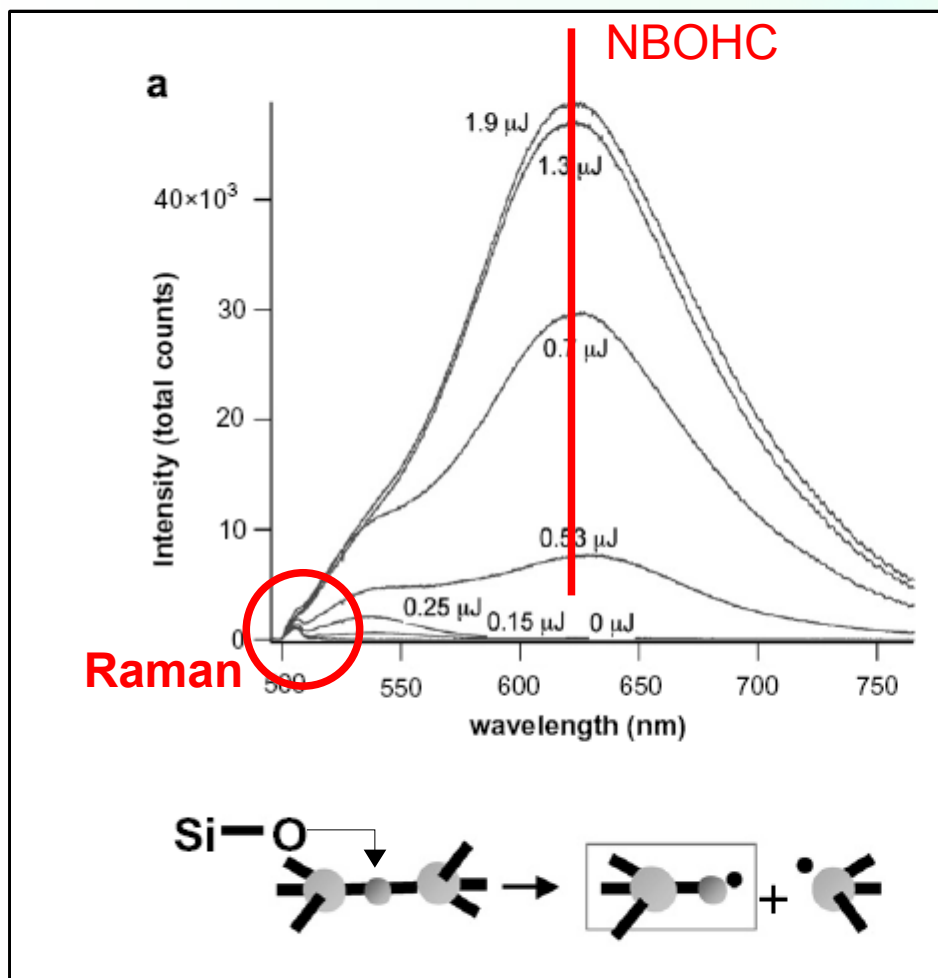


zderzenie wzbudzonego elektronu z elektronem walencyjnym:  
**dwa elektrony w paśmie walencyjnym**

Przeniesienie energii wzbudzonych elektronów do sieci wywołuje jej modyfikacje:

- Dysypacja następuje w skali czasowej 100ns-10 $\mu$ s
- Główne mechanizmy: dyfuzja termiczna, generacja fali uderzeniowej (gwałtowny wzrost ciśnienia, temperatury)

# Szklą fotomodyfikowalne – mechanizm modyfikacji



Naświetlanie szkła kwarcowego generuje centra barwne typu nonbridging oxygen hole centers (NBOHC)

## Zrywanie wiązań

Podobne efekty uzyskuje się dla naświetlania promieniami X (Röntgen-odkrycie fotomodyfikalności – zbrązowienia szkła) i neutronami.

Fig. 5. Photoluminescence spectra of fs-modified (a) fused silica and (b) IOG-1glass; 488 nm light from an Ar<sup>+</sup> laser was used as the excitation source. The different curves in (a) represent different fs pulse energies used for modification. The diagrams on the bottom show the defect structures responsible for the fluorescence and how they result from bond-breaking in the glass network.

# Szklá fotomodyfikowalne – mechanizm modyfikacji

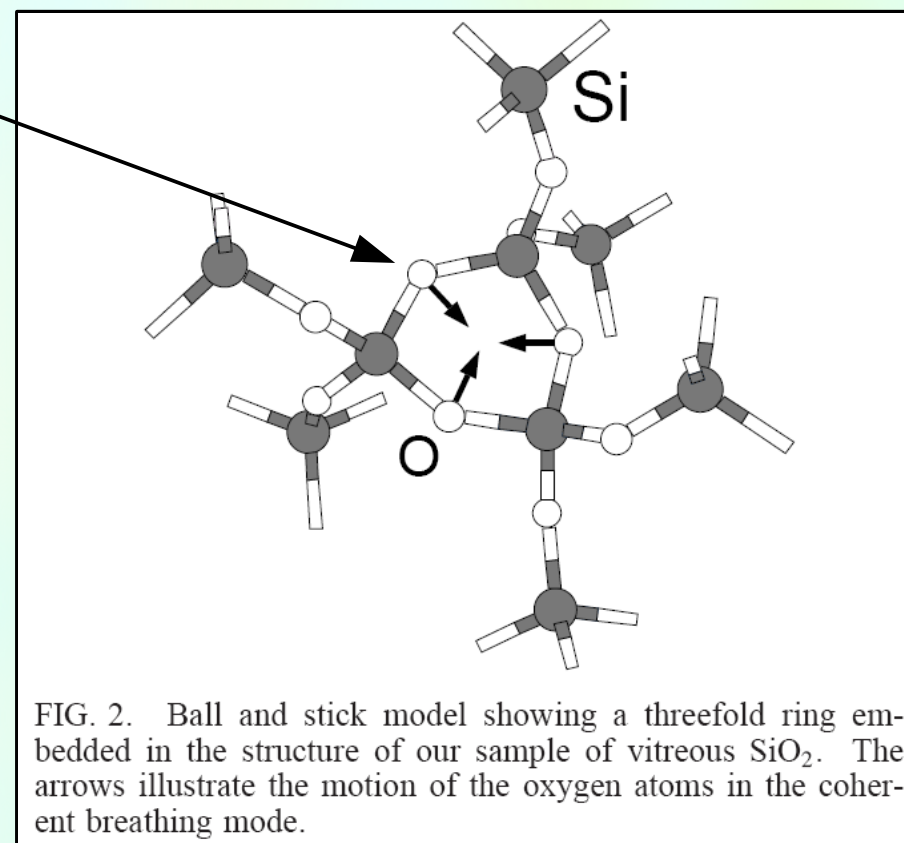
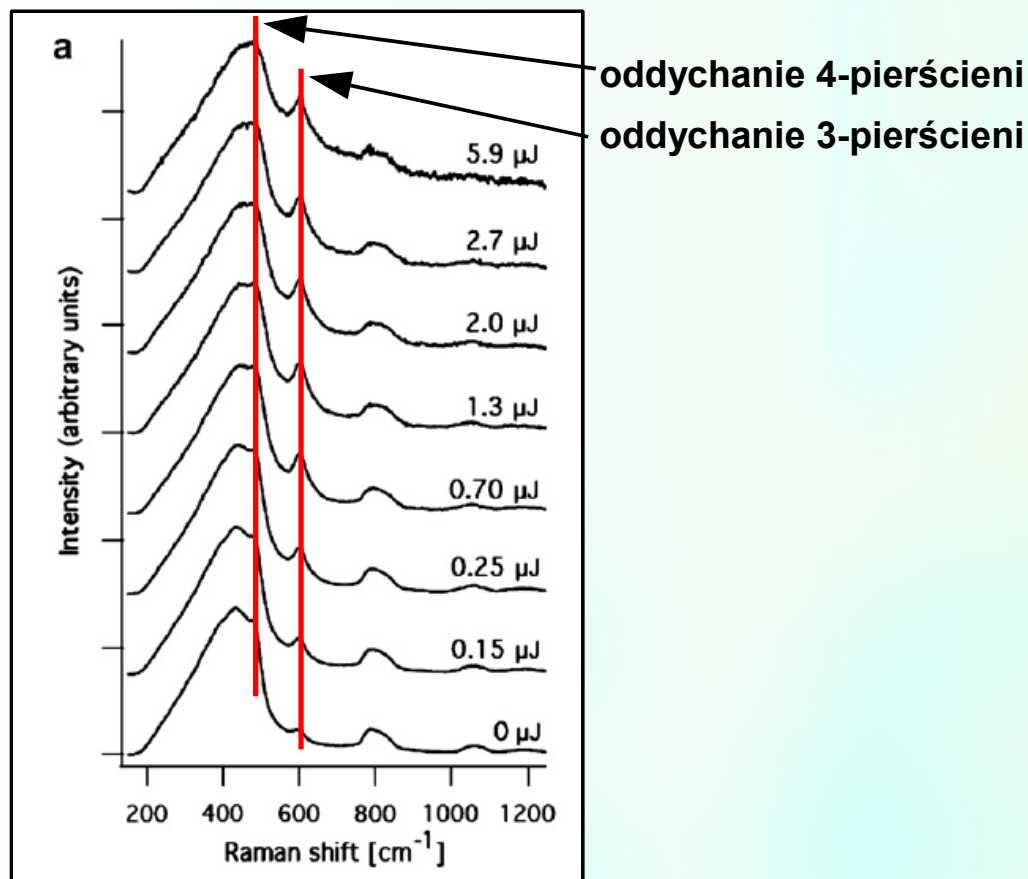


Fig. 6. (a) Raman spectra for fused silica modified by fs pulses of different energies (cf. Fig. 3) and (b) the total area under the 605  $\text{cm}^{-1}$  Raman peak as a function of fs pulse energy. The two symbols denote data from two experimental runs.

Absorpcja energii lasera prowadzi do zwiększenia intensywności pików odpowiadających potrójnym i poczwórnym pierścieniom Si w porównaniu z nienaświetloną próbką.

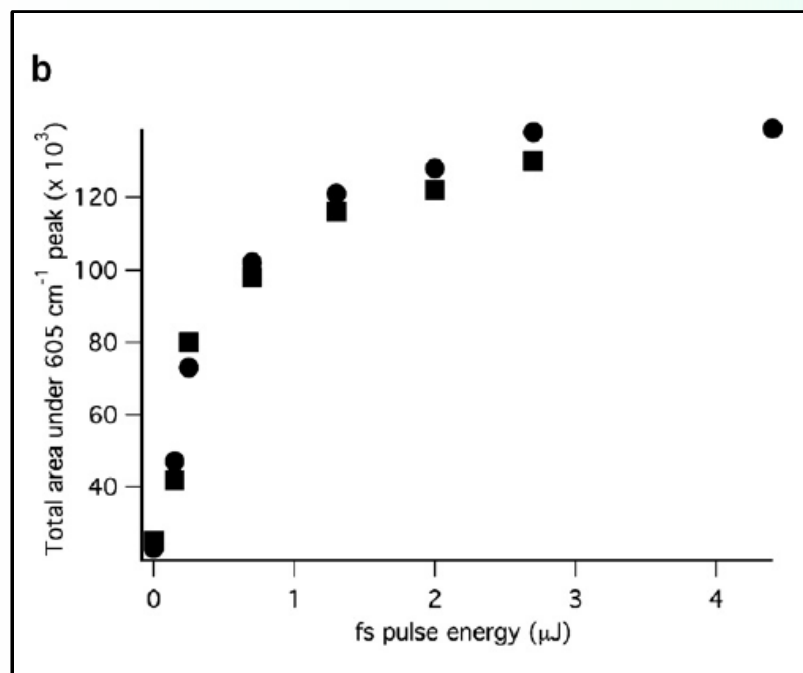
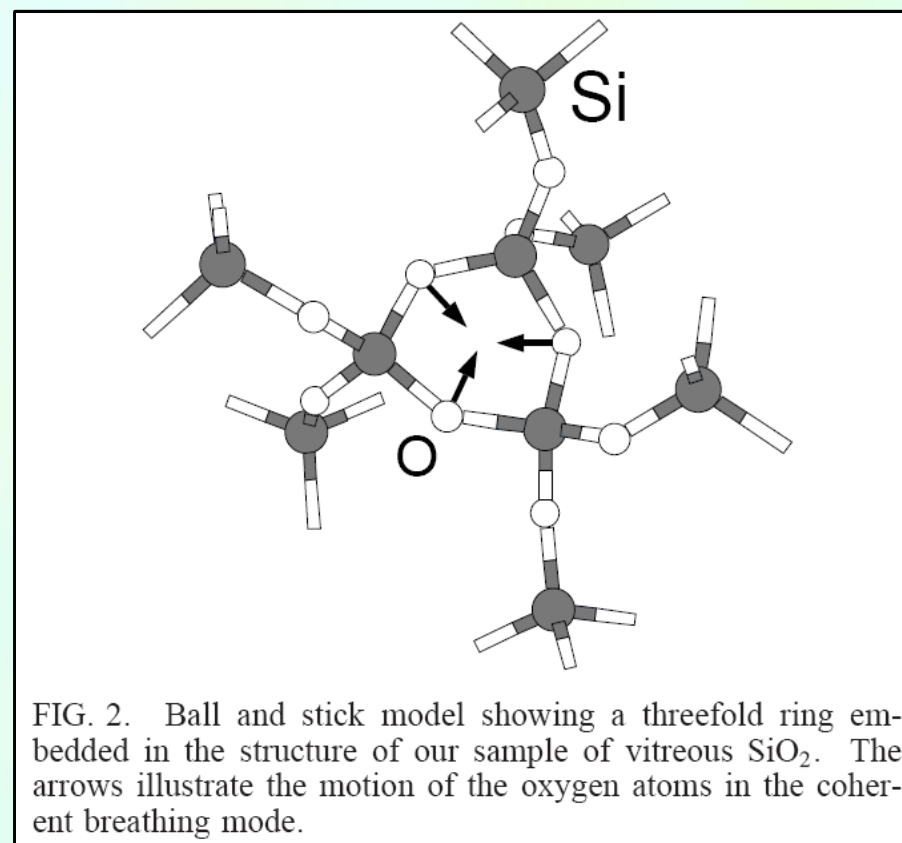


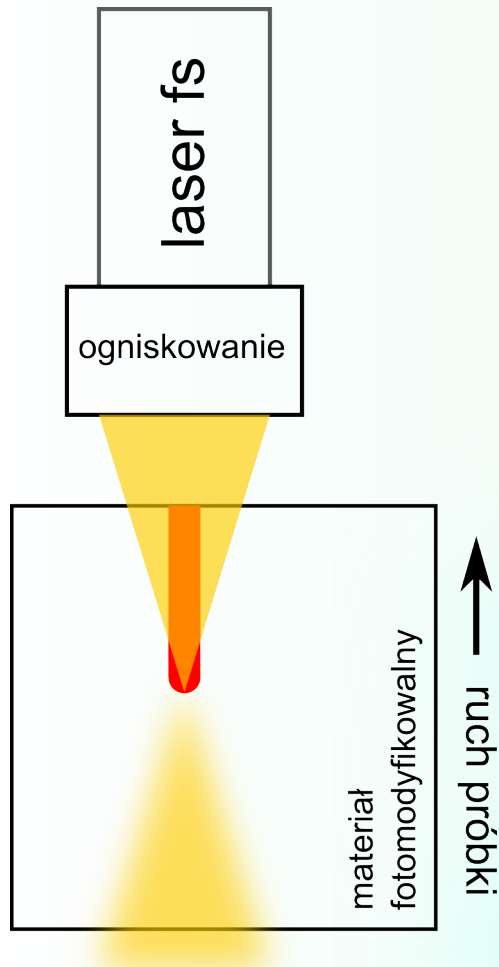
Fig. 6. (a) Raman spectra for fused silica modified by fs pulses of different energies (cf. Fig. 3) and (b) the total area under the  $605\text{ cm}^{-1}$  Raman peak as a function of fs pulse energy. The two symbols denote data from two experimental runs.



Absorpcja energii lasera **zwiększenia gęstości szkła** poprzez zwiększenia udziału małych pierścieni Si w strukturze szkła – korelacja z właściwościami optycznymi (współczynnik załamania)

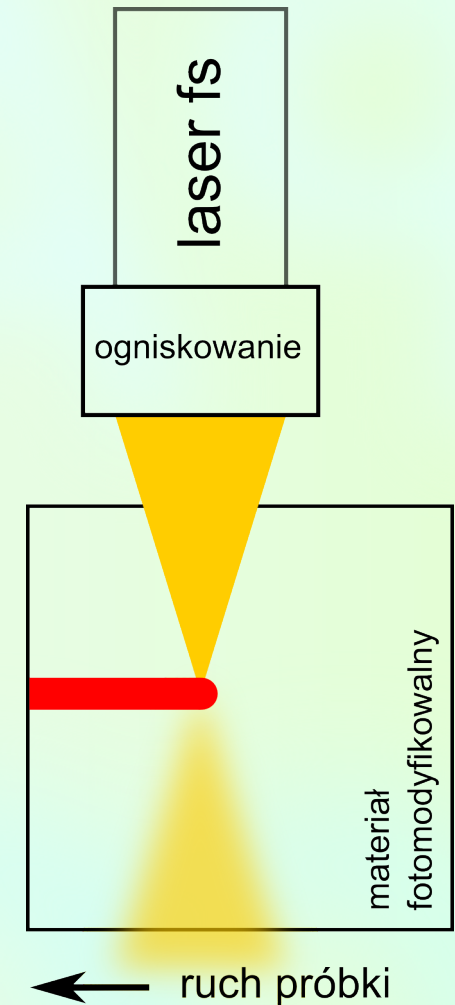
# Szklá fotomodýfikowalne – pisanie światłowodów

Zmiany współczynnika załamania  
 $\Delta n \sim 10^{-4} - 10^{-2}$



Konfiguracja równoległa:

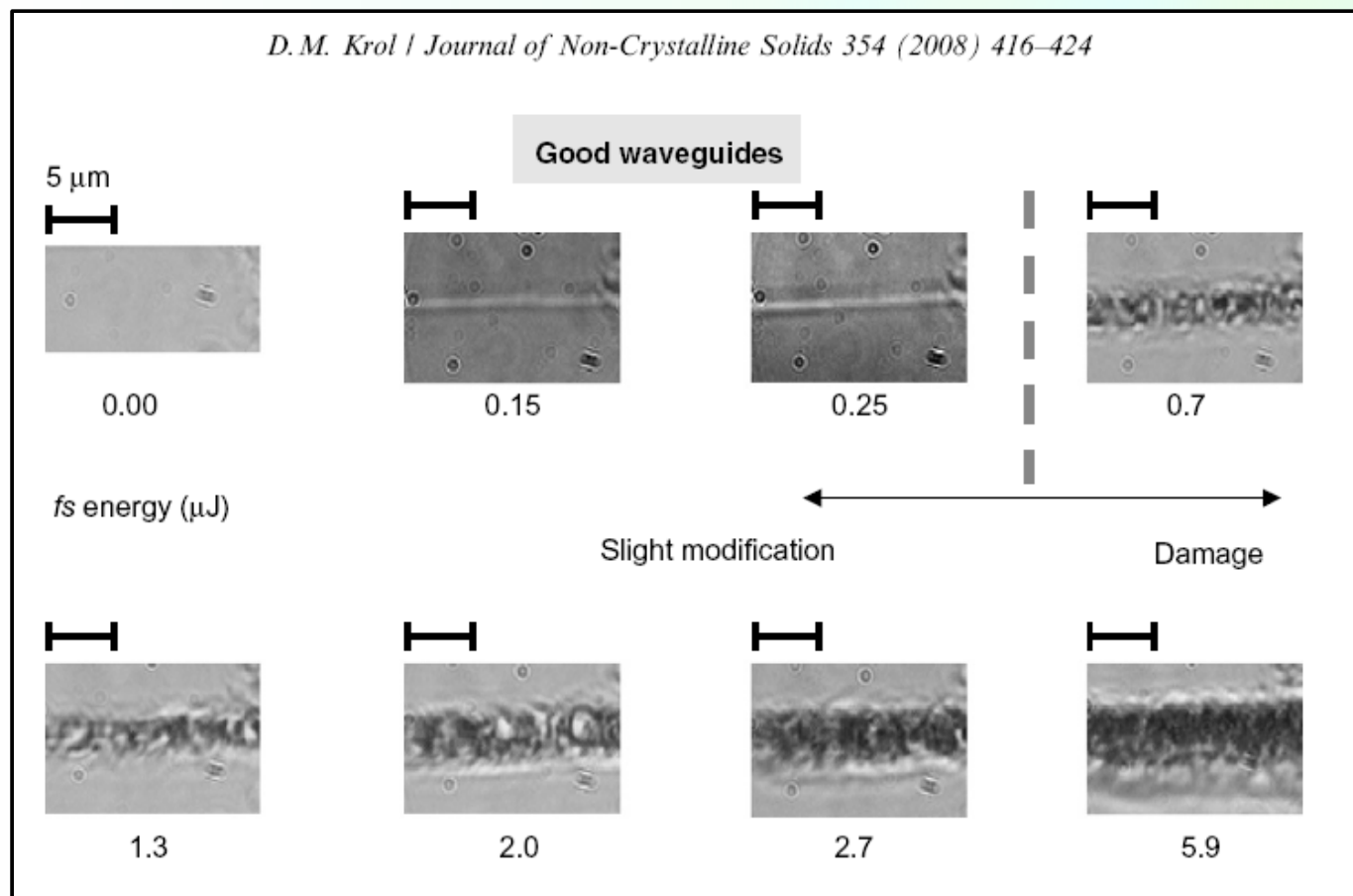
- **okrągły** przekrój falowodu (radialna symetria wiązki)
- mechanika mikroskopu ogranicza długość falowodu



Konfiguracja prostopadła:

- **eliptyczny** przekrój falowodu (ogniskowanie)
- „dowolna” długość falowodu

# Szklą fotomodyfikowalne – pisanie światłowodów



$\Delta t \approx 100\text{ps}$

częstotliwość  
repetycji  $\sim \text{kHz}$

White-light microscopy images showing the morphology of waveguides and damage lines written inside fused silica at  $40 \mu\text{m/s}$  using different fs pulse energies through a  $50\times$  objective.

Uzyskanie dobrych falowodów możliwe jest tylko przy stosowaniu odpowiedniej fluencji ( $\text{J}/\text{cm}^2$ ). Na efektywność wpływa fluencja (na impuls) i częstotliwość repetycji.

W przypadku częstotliwość repetycji  $\sim \text{MHz}$  i fluencji  $\sim \text{nJ}$  próbka ulega lokalnemu stopieniowi (odprowadzanie energii z ogniska zbyt wolne) i kształt przekroju falowodu jest niezależny od konfiguracji pisania (równoległej czy prostopadłej).

# Szklą fotomodyfikowalne – zależność od rodzaju materiału

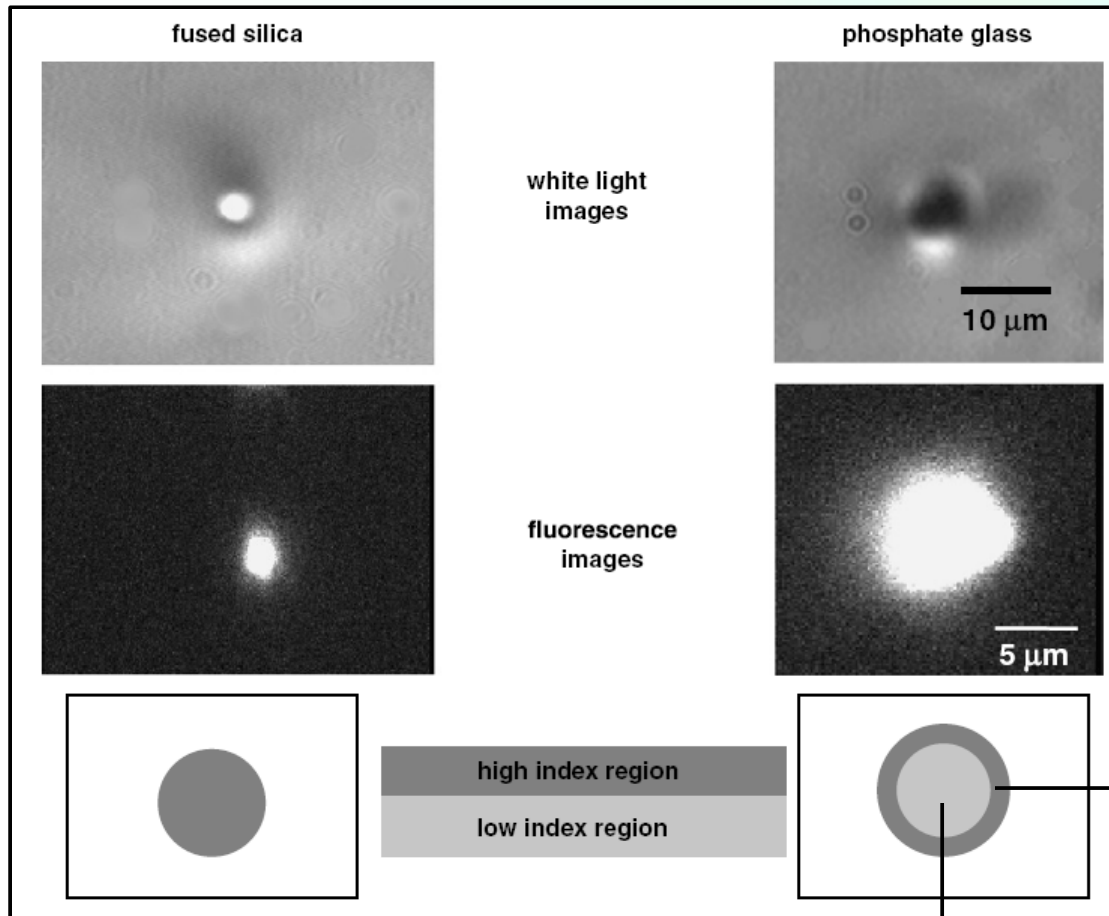


Fig. 7. White light (top) and fluorescence (center) images for fs-laser modified fused silica and IOG-1 glass together with an illustration of the induced index changes.

obraz końcówki falowodu  
w szkłe krzemowym przewodzi  
obszar naświetlony  
w szkłe fosforowym przewodzi  
obszar zewnętrzny

Mikroskopia fluorescencyjna i  
Ramanowska wskazują na  
występowanie NBOHC i  
zwiększenie liczby pierścieni Si  
tylko w obszarach  
naświetlonych.

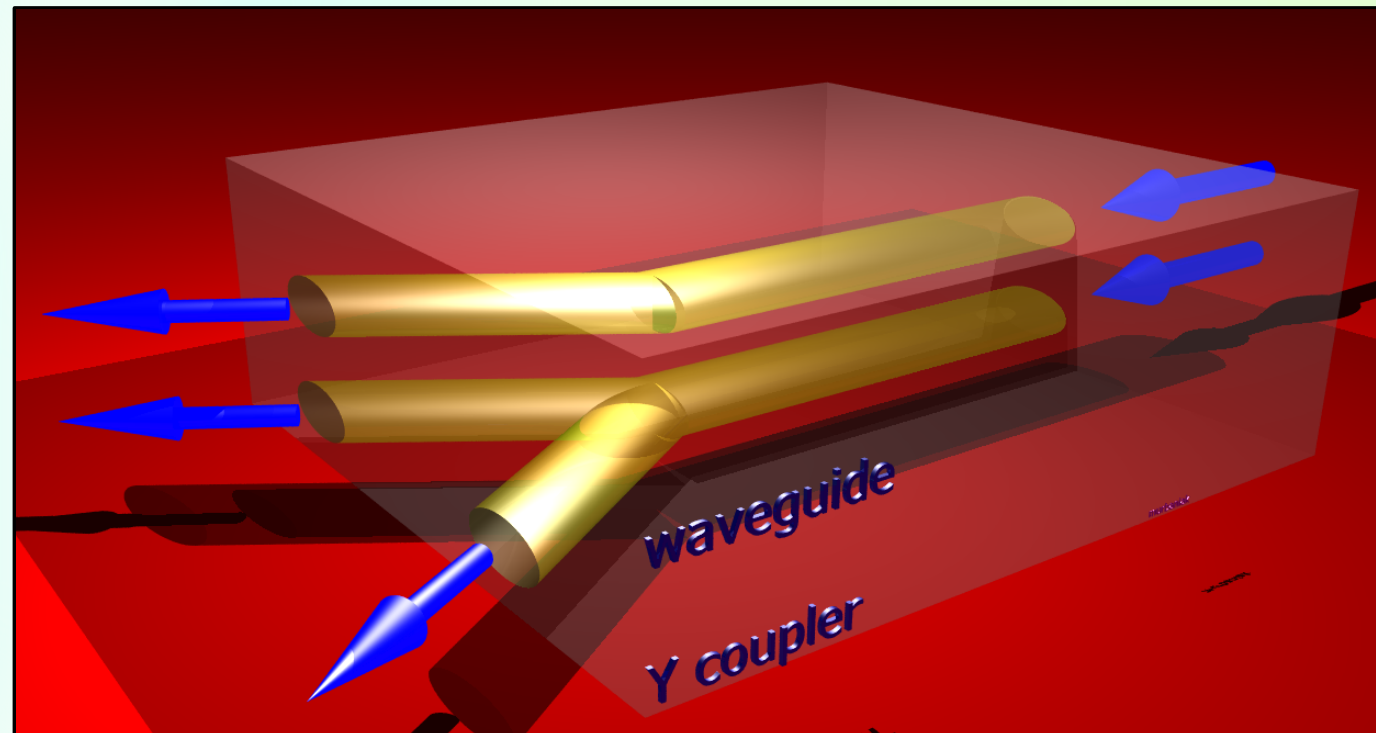
Zwiększenie  $n$  w obszarze  
wewnętrznym wywołane  
naprężeniami związanymi z  
rozszerzeniem naświetlonego  
obszaru.

Spadek współczynnika załamania  $n$  w obszarze  
naświetlonym w szkłe fosforowym związany z  
zależnością  $n$  od szybkości schładzania  
(zmniejszenie gęstości)

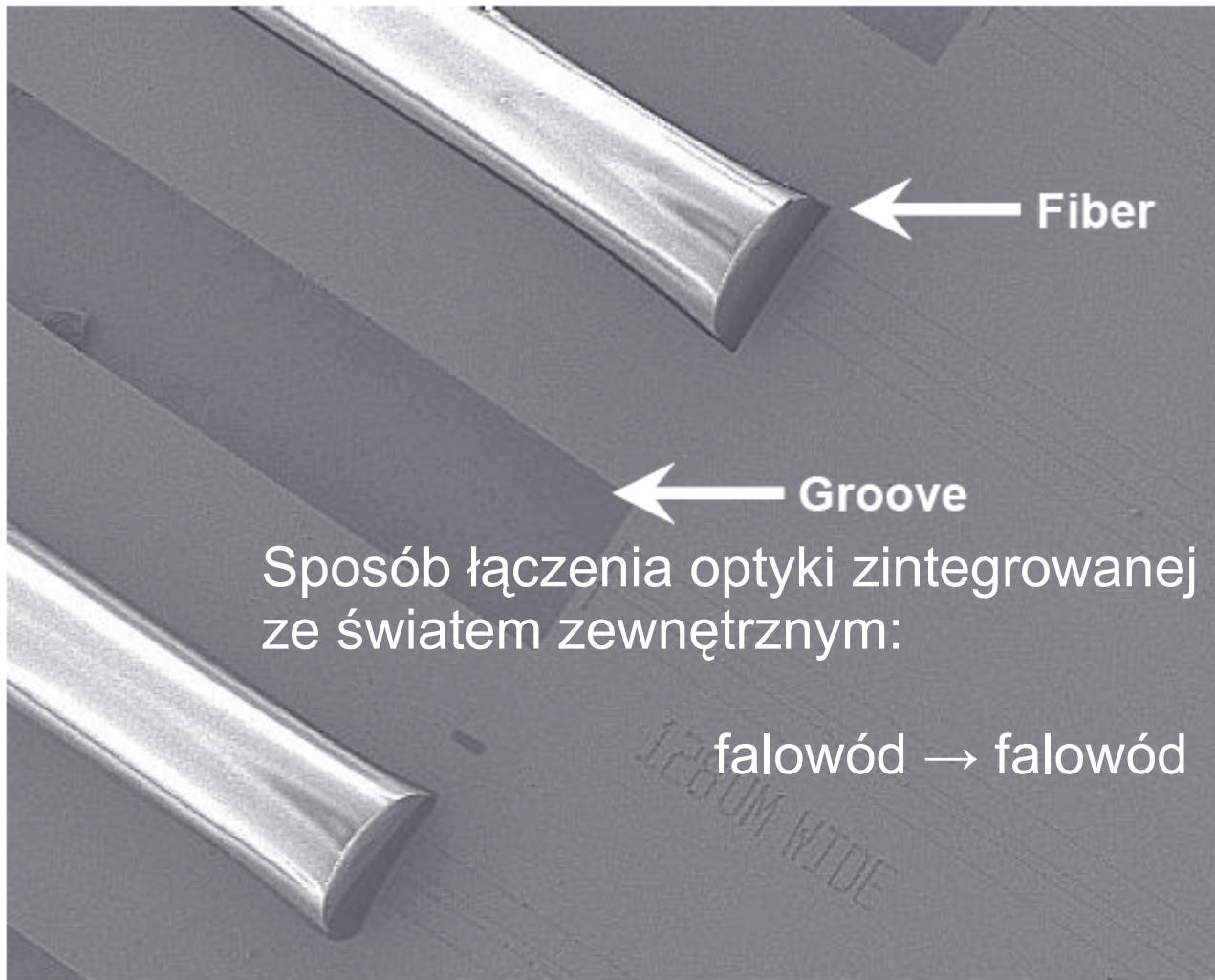
# Struktury $\Delta n$

Struktury  $\Delta n$  to 1,2 i 3D struktury z obszarami o zmodyfikowanych właściwościach optycznych:

- zmiana współczynnika załamania  $\Delta n \sim 10^{-4} - 10^{-2}$
- współczynnik tłumienia obszarów zmodyfikowanych (fallowody)  $\sim 1\text{dB/cm}$  ( $0.36\text{dB/cm}$  [10])  
(w światłowodach  $0.2\text{dB/km}$ )
- szybkość pisania:  $\sim 10\mu\text{/s} - 1\text{cm/s}$
- Typowe struktury  $\Delta n$ :
  - falowody [6,7]
  - power splitters [11]
  - modulatory
  - phase shifters [1]



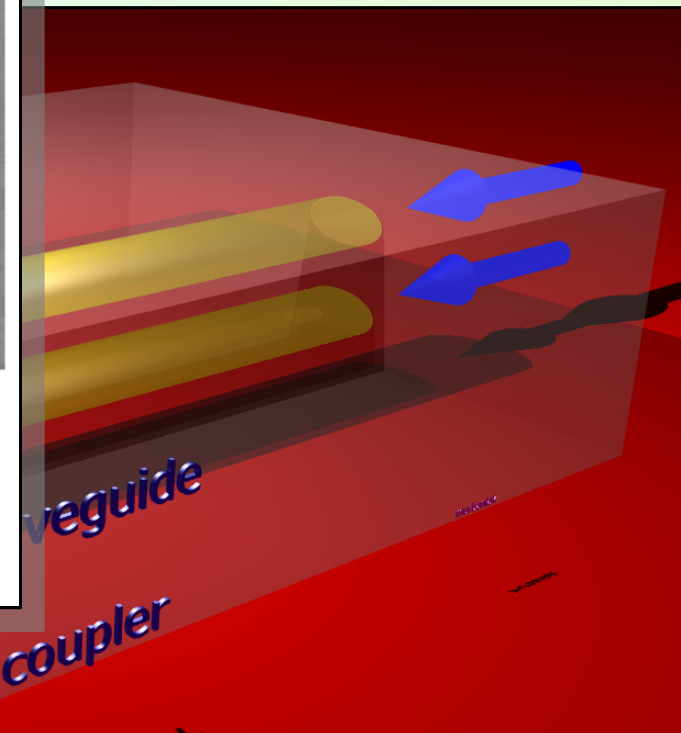




**Figure 19: Scanning Electron Micrograph of several U-grooves, two of which are populated with optical fibers and aligned to silicon waveguides**

ych własnościach

)~1dB/cm (0.36dB/cm [10])



## Struktury $\Delta n$ – dzielnik mocy

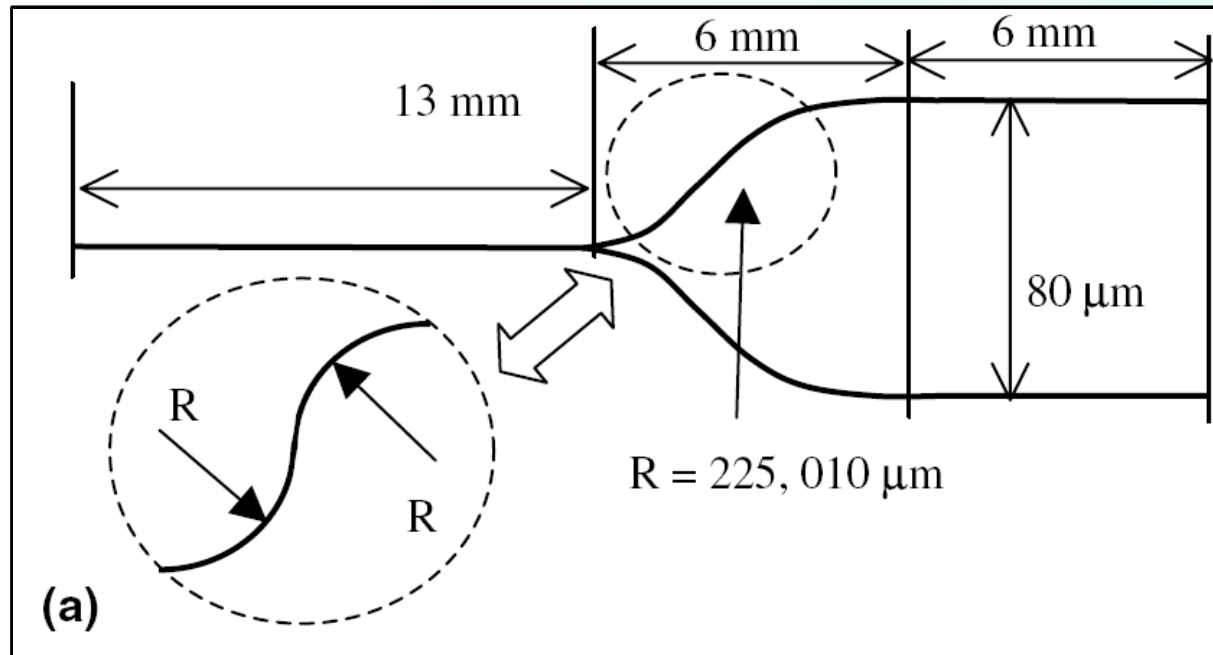


Fig. 1. Schematic design diagrams of 1-to-N optical waveguide power splitters: (a) 1-to-2 splitter; (b) 1-to-4 splitter; and (c) 1-to-8 splitter.

- szkło kwarcowe
- 125fs, 150kHz,  $\lambda=800\text{nm}$ , 52mW
- 50 $\mu\text{m/s}$
- precyzja pozycjonowania 50nm
- $R=225\mu\text{m}$  – minimalne „bending losses”
- przekrój falowodu 4 $\mu\text{m}\times 9.7\mu\text{m}$  (podwójny skan)

## Struktury $\Delta n$ – dzielnik mocy

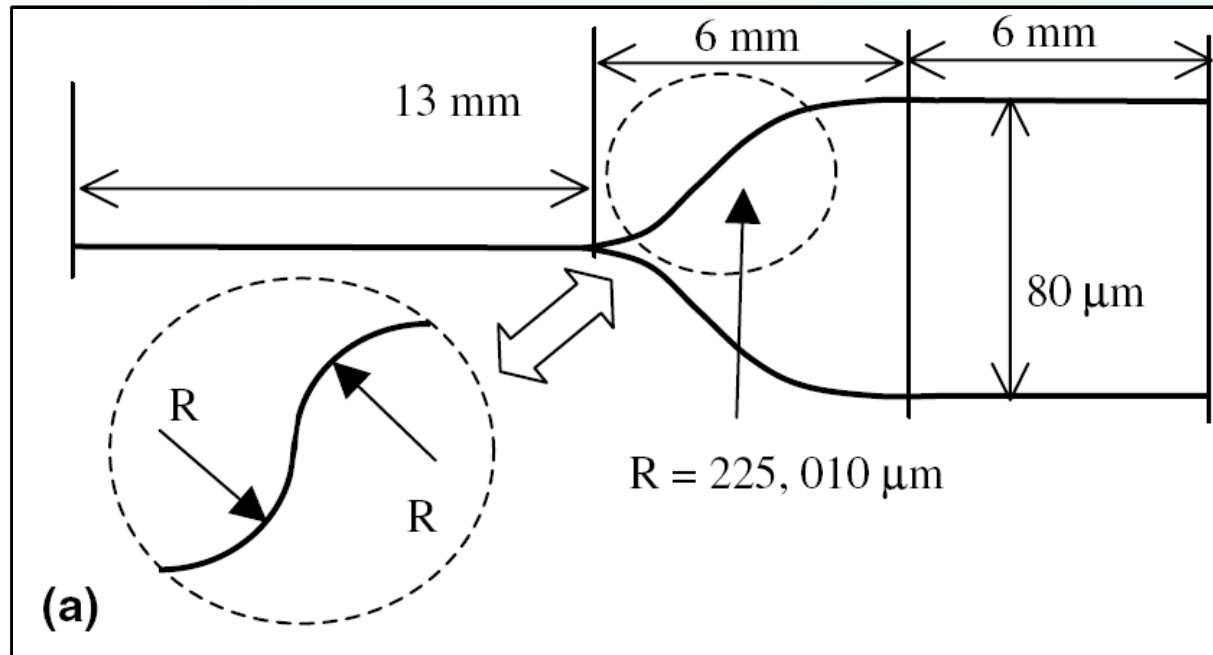


Fig. 1. Schematic design diagrams of 1-to-N optical waveguide power splitters: (a) 1-to-2 splitter; (b) 1-to-4 splitter; and (c) 1-to-8 splitter.

- szkło kwarcowe
- 125fs, 150kHz,  $\lambda=800\text{nm}$ , 52mW
- 50 $\mu\text{m/s}$
- precyzja pozycjonowania 50nm
- $R=225\mu\text{m}$  – minimalne „bending losses”
- przekrój falowodu 4 $\mu\text{m}\times 9.7\mu\text{m}$  (podwójny skan)

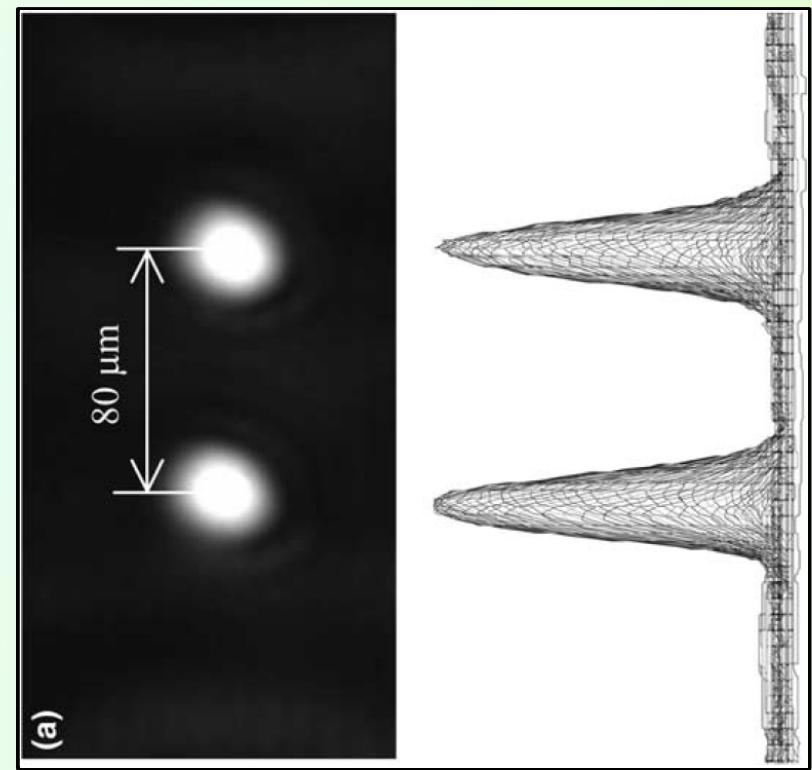


Fig. 2. Far-field patterns of 1-to-N optical waveguide Power splitters fabricated by the double-scan writing technique with the interscan shift of 1.5  $\mu\text{m}$ : (a) 1-to-2 splitter; (b) 1-to-4 splitter; and (c) 1-to-8 splitter.

# Struktury $\Delta n$ – dzielnik mocy

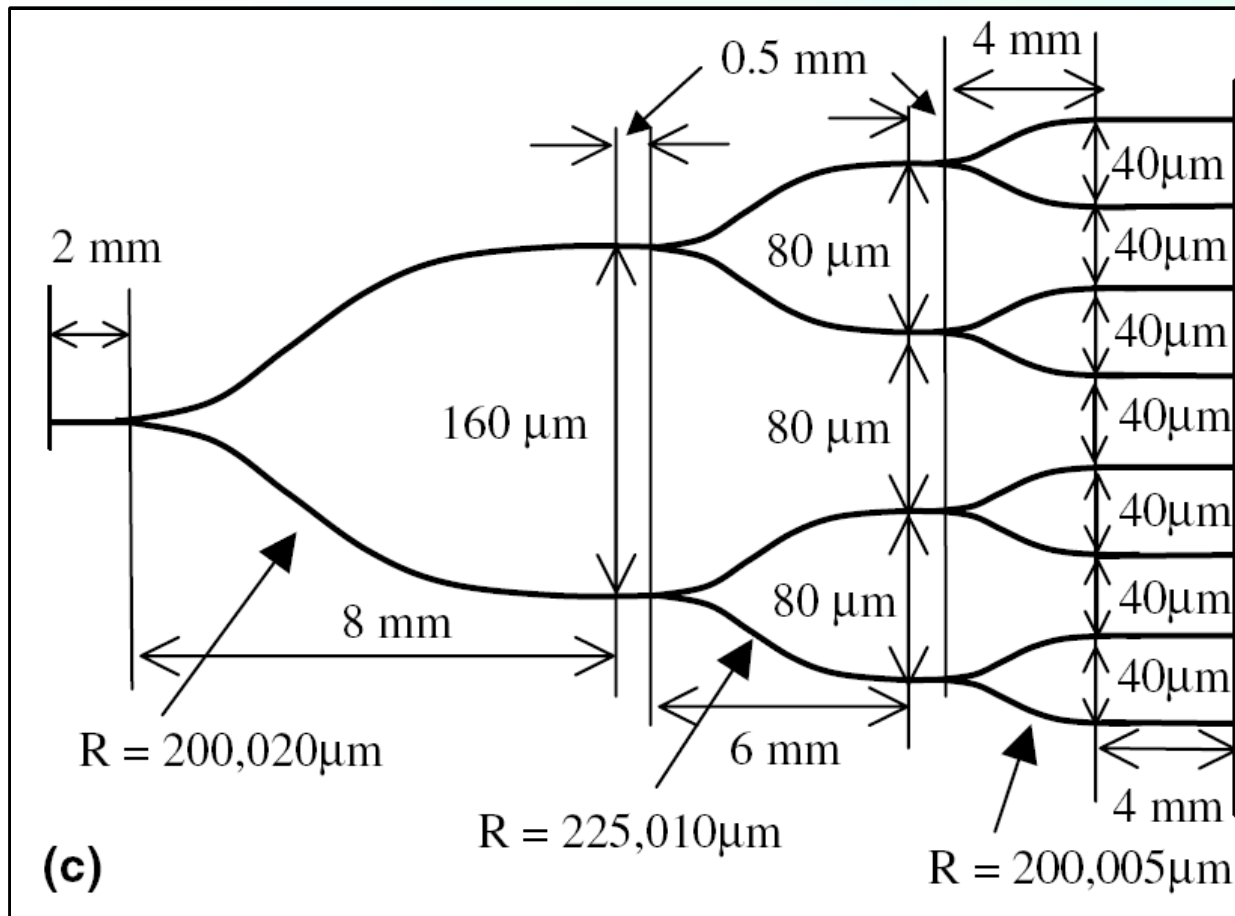


Fig. 1. Schematic design diagrams of 1-to-N optical waveguide power splitters: (a) 1-to-2 splitter; (b) 1-to-4 splitter; and (c) 1-to-8 splitter.

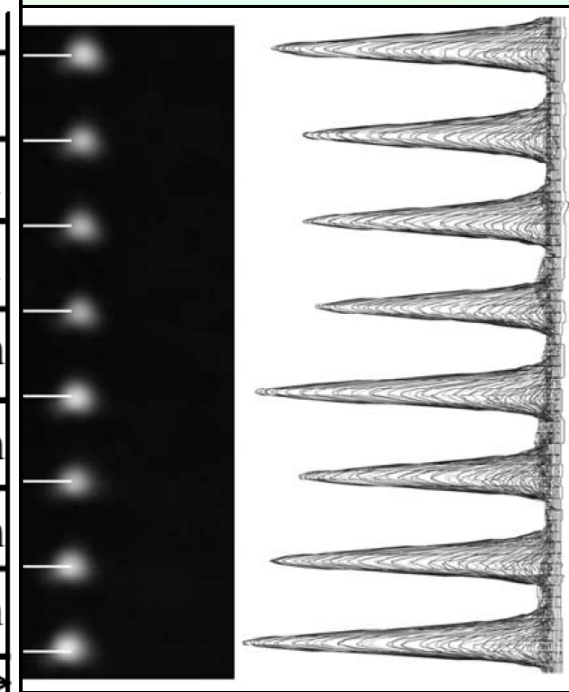


Fig. 2. Far-field patterns of 1-to-N optical waveguide Power splitters fabricated by the double-scan writing technique with the interscan shift of 1.5  $\mu\text{m}$ : (a) 1-to-2 splitter; (b) 1-to-4 splitter; and (c) 1-to-8 splitter.

Równomierne rozprowadzenie wejściowej wiązki światła do ośmiu falowodów wyjściowych

- Zastosowanie silnych wiązek światła pozwala na lokalne modyfikowanie własności szkieł poprzez efekty wielofotonowe
- Jednym ze skutków oddziaływania ze światłem jest zmiana współczynnika załamania światła ( $\Delta n \sim 10^{-4} - 10^{-2}$ )
- Zmiany własności optycznych pozwalają na tworzenie falowodów i innych elementów do zastosowań w optyce zintegrowanej

# Literatura

- [1] Mike Salib et al., Silicon Photonics, Intel Technology Journal, **8**, 143 (2004)
- [2] Fiber-Optics Devices TOSLINK™, Product Guide, Toshiba Corporation,  
[www.semicon.toshiba.co.jp/eng/index.html](http://www.semicon.toshiba.co.jp/eng/index.html)
- [3] Katsunari Okamoto, „Fundamentals of Optical Waveguides” Academic Press
- [4] Stephen Kukureka, Fibre Optic Materials, [www.download.bham.ac.uk/eng/metallurgy/kukureka/presentation/  
FibreOpticsMaterials.pdf](http://www.download.bham.ac.uk/eng/metallurgy/kukureka/presentation/FibreOpticsMaterials.pdf)
- [5] Christopher C. Davis, <http://www.ece.umd.edu/~davis/optfib.html>
- [6] M. Ams, G. D. Marshall, P. Dekker, and M. J. Withford, PIERS ONLINE, **4**, 146 (2008)
- [7] D.M. Krol, Journal of Non-Crystalline Solids **354** (2008) 416–424
- [8] M. Masuda et al., Appl. Phys. A **76**, 857–860 (2003)
- [9] Alfredo Pasquarello, Roberto Car, Phys. Rev. Lett. **80**, 5145 (1998)
- [10] M. Ams, G. D. Marshall, M. J. Withford, OPTICS EXPRESS, **14**, 13158 (2006)
- [11] Jiaren Liu, Zhiyi Zhang, Shorze Chang, Costel Flueraru, Chander P. Grover, Optics Communications **253**, 315 (2005)
- [12] D. W. Huang, Fundamentals and Applications of Optical Waveguides,  
<http://ccms.ntu.edu.tw/~dwhuang/courses/optwg/>
- [13] Wikipedia, [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org)

# Podziękowania

Prezentację wykonano za pomocą programu Impress pakietu  
OpenOffice.org  
([www.openoffice.org](http://www.openoffice.org))

Ilustracje wykonano za pomocą programów:

- POV-Ray™ ([www.povray.org](http://www.povray.org)) - wersja 3.6.1c.icl8.win32
- Inkscape 0.46 ([www.inkscape.org](http://www.inkscape.org))