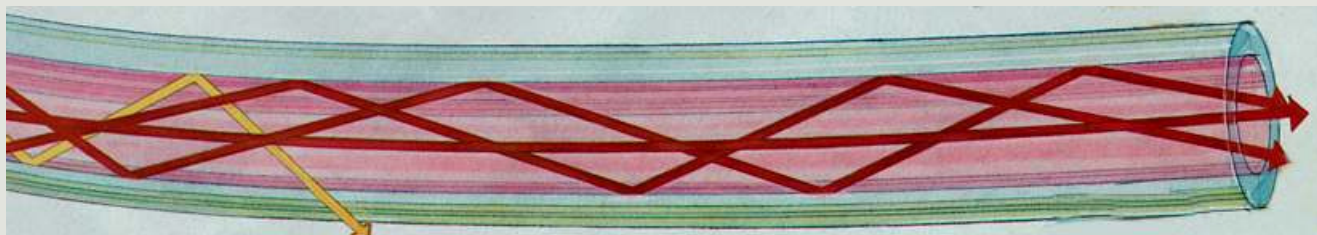


Światłowody – elementarz



Trochę historii ...

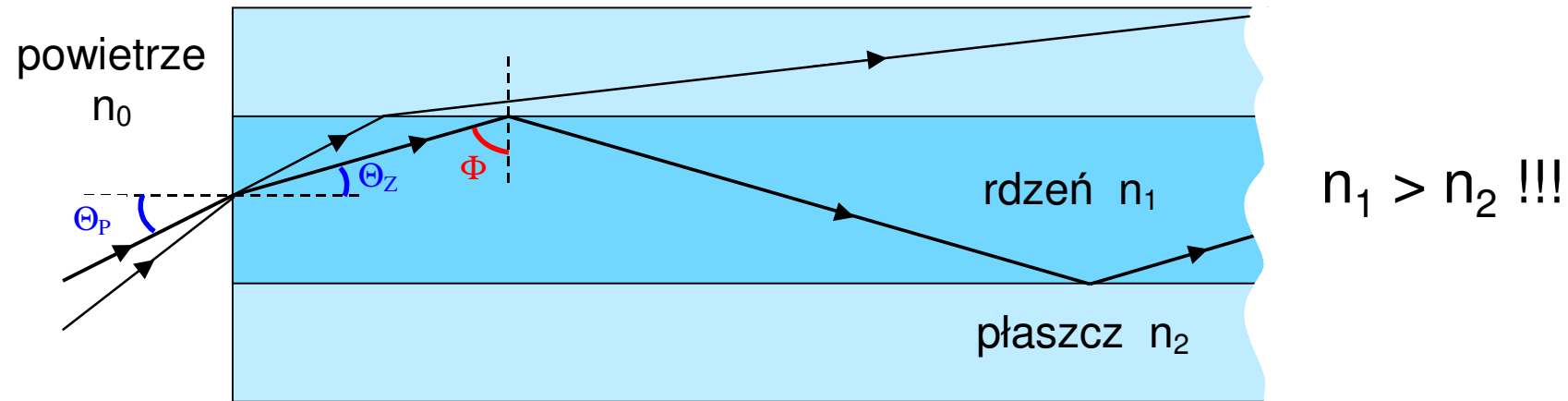
- 1854 - John Tyndall - propagacja światła w strumieniu wody
- 1940 - metoda wytwarzania czystego SiO_2 (Corning Glass)
- 1962 - laser półprzewodnikowy GaAs (GE, IBM, MIT)
- 1974 - światłowód o tłumieniu $< 2 \text{ dB/km}$;
- 1978 - laser na pasmo 1300 nm;
- 1980 - laser na pasmo 1550 nm;
- 1987 –światłowodowy wzmacniacz optyczny EDFA
- 1990 – multipleksacja falowa WDM (Bell Labs)



Dlaczego transmisja światłowodowa?

- Potencjalnie bardzo szerokie pasmo transmisyjne (kilkadziesiąt THz)
- Niskie tłumienie
- Odporność na zaburzenia elektromagnetyczne
- Brak generacji zewnętrznych pól EM
- Separacja galwaniczna pomiędzy nadajnikiem a odbiornikiem
- Mały ciężar włókna światłowodowego

Idea propagacji światła w światłowodzie skokowym



$$n_0 \sin \Theta_p = n_1 \sin \Theta_z \quad (\text{zasada Sneliusa})$$

$$n_1 \sin \Phi_p = n_2 \sin \Phi_z \longrightarrow \sin \Phi_K = n_2 / n_1 \longrightarrow \text{dla } \Phi > \Phi_K \text{ zachodzi całkowite wewnętrzne odbicie}$$

apertura numeryczna

$$NA = \frac{n_1}{n_0} \sin \Theta_{PK} \approx \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

$$n_1=1,46 \quad n_2=1,42 \Rightarrow NA=0,34 \quad (\text{kąt akceptacji } 20^\circ)$$

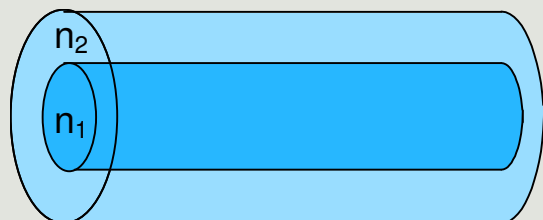
$$n_1=1,44 \quad n_2=1,42 \Rightarrow NA=0,24 \quad (\text{kąt akceptacji } 13^\circ)$$

Problem:

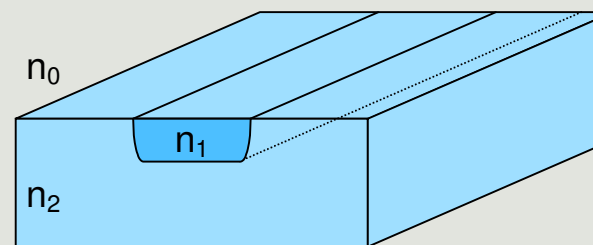
Czy apertura numeryczna
powinna być duża, czy mała?

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \approx \text{kąt akceptacji (w radianach)}$$

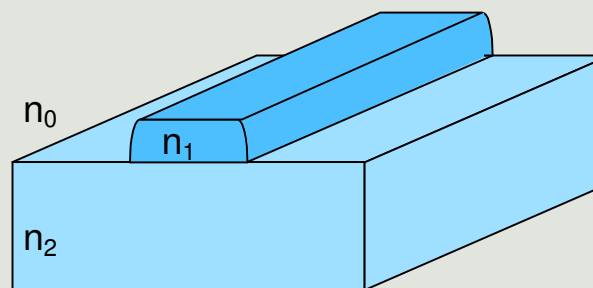
Konstrukcje przestrzenne światłowodów



światłowod włóknisty
(cylindryczny,
o przekroju kołowym)

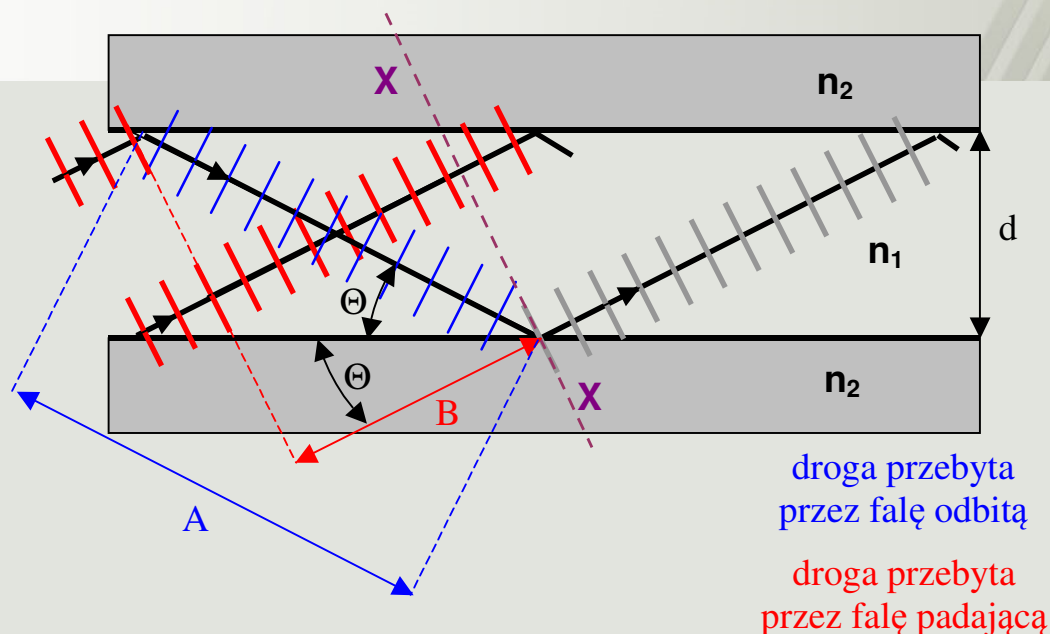


$$n_1 > n_2, n_1 > n_0$$



światłowod planarne

Ilustracja powstawania modów propagacyjnych



Pomijając przesunięcie fazy przy odbiciu warunek zgodności faz w płaszczyźnie X ma postać:

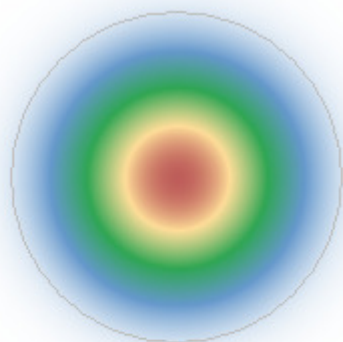
$$A - B = m\lambda_1 \quad (\lambda_1 \text{ to dl. fali w osr. o wsp.zal. } n_1)$$

co prowadzi do:

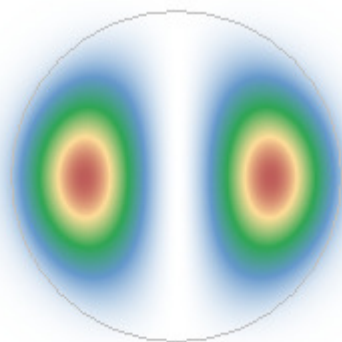
$$2d \sin \Theta = m\lambda_1$$

MODY PROPAGACYJNE - różne rodzaje pól, które mogą się rozchodzić w światłowodzie \approx zbiór możliwych „zygzaków”

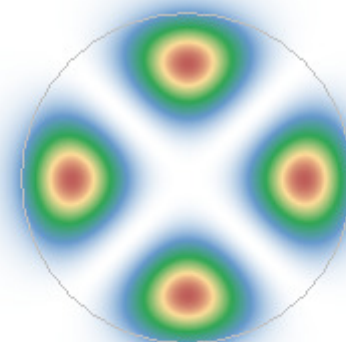
Rozkład gęstości mocy dla różnych modów



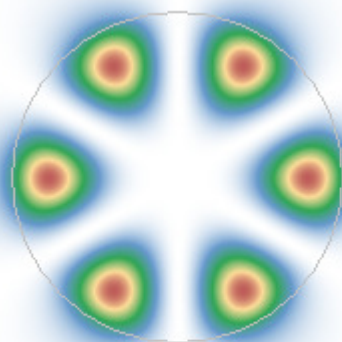
LP_{0,1}



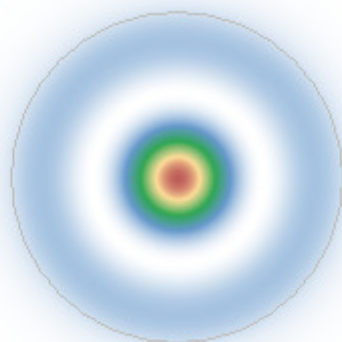
LP_{1,1}



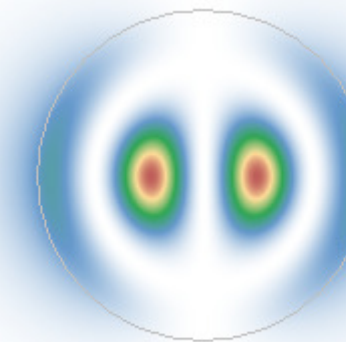
LP_{2,1}



LP_{3,1}



LP_{0,2}



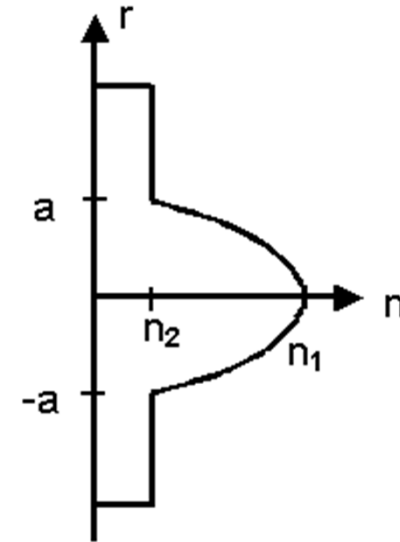
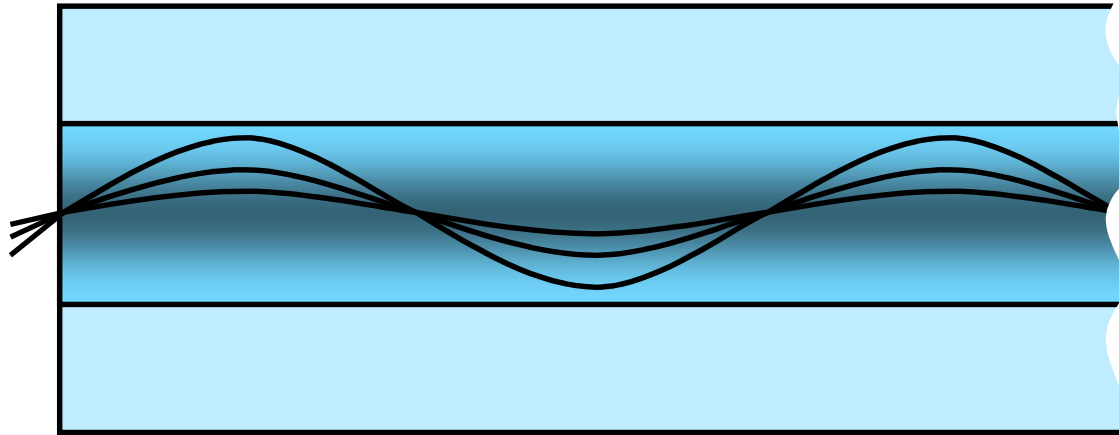
LP_{1,2}

Uwaga: dystrybucja mocy wykracza poza obrys rdzenia!

Parę wątpliwości

- Czy wielość modów jest korzystna czy niekorzystna?
- Czy można korzystając z kilku modów przesyłać kilka niezależnych sygnałów?
- Czy mod trzeba wzbudzić, czy wzbudzi się sam?

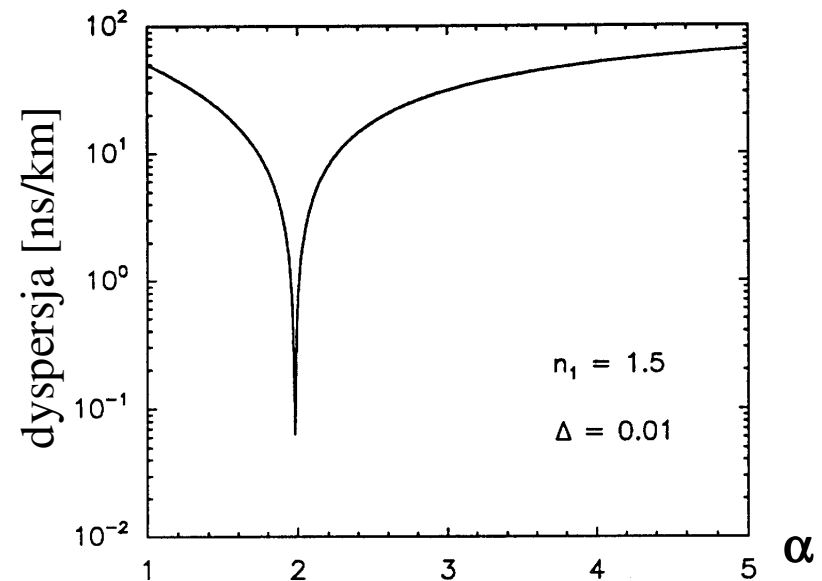
Światłowód gradientowy



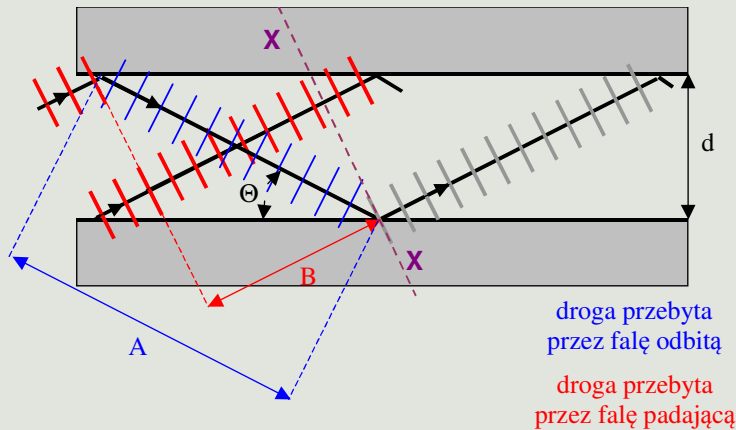
$$n(r) = n_1 \left(1 - \Delta (r/a)^\alpha \right) ; \quad r < a$$

$$n(r) = n_2 ; \quad r \geq a$$

$$\Delta = (n_1 - n_2) / n_1$$



Światłowód jednomodowy



$$A - B = 2d \sin \Theta = m \lambda_1 = m \frac{\lambda_0}{n_1}$$

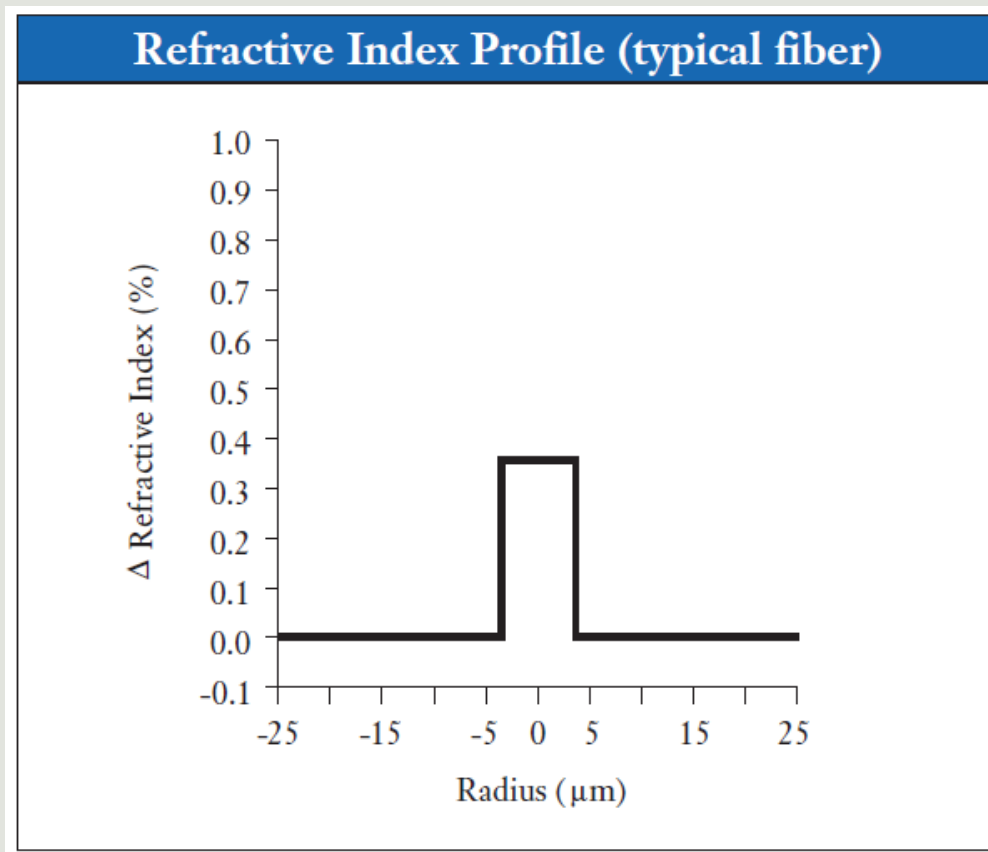
$$m = \frac{2d \sin \Theta}{\lambda_0} n_1 < 1$$

$$d \leq \frac{\lambda_0}{2 \cdot NA}$$

Dokładne rozwiązanie równań Maxwella dla światłowodu cylindrycznego daje wynik:

$$d \leq 0.77 \frac{\lambda_0}{NA}$$

Profil wsp. załamania standardowego światłowodu jednomodowego



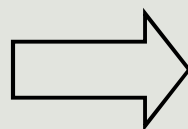
źródło: Corning, SMF-28

Uwaga 1.

Światłowód z napisem „jednomodowy” nie w każdych warunkach jest jednomodowy:

$$d \leq 0.77 \frac{\lambda}{NA} \quad \Rightarrow \quad \lambda \geq \frac{d \cdot NA}{0.77}$$

Corning® SMF-28™ Optical Fiber
Product Information



Cable Cutoff Wavelength (λ_{ccf})
 $\lambda_{ccf} \leq 1260 \text{ nm}$

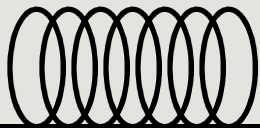

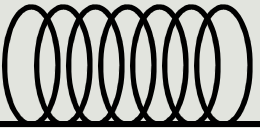
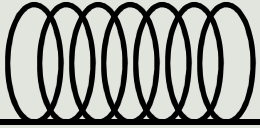
Uwaga 2.

W tech. światłowodowej przez λ rozumiemy zwykle
dł. fali **w próżni**, po czym zapominamy, że w takiej konwencji
w ośrodku materialnym wynosi ona λ/n !

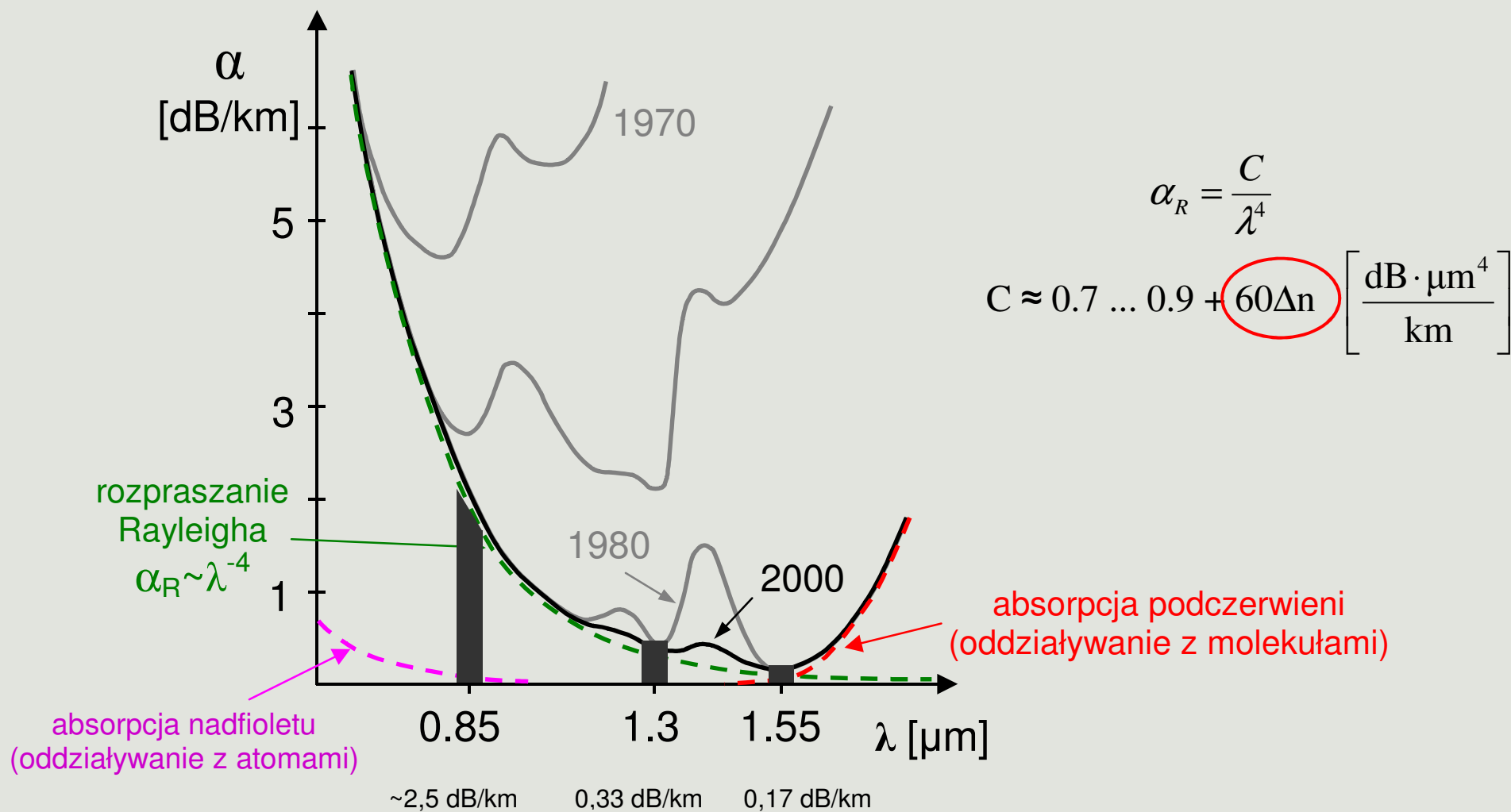
Tłumienność światłowodów

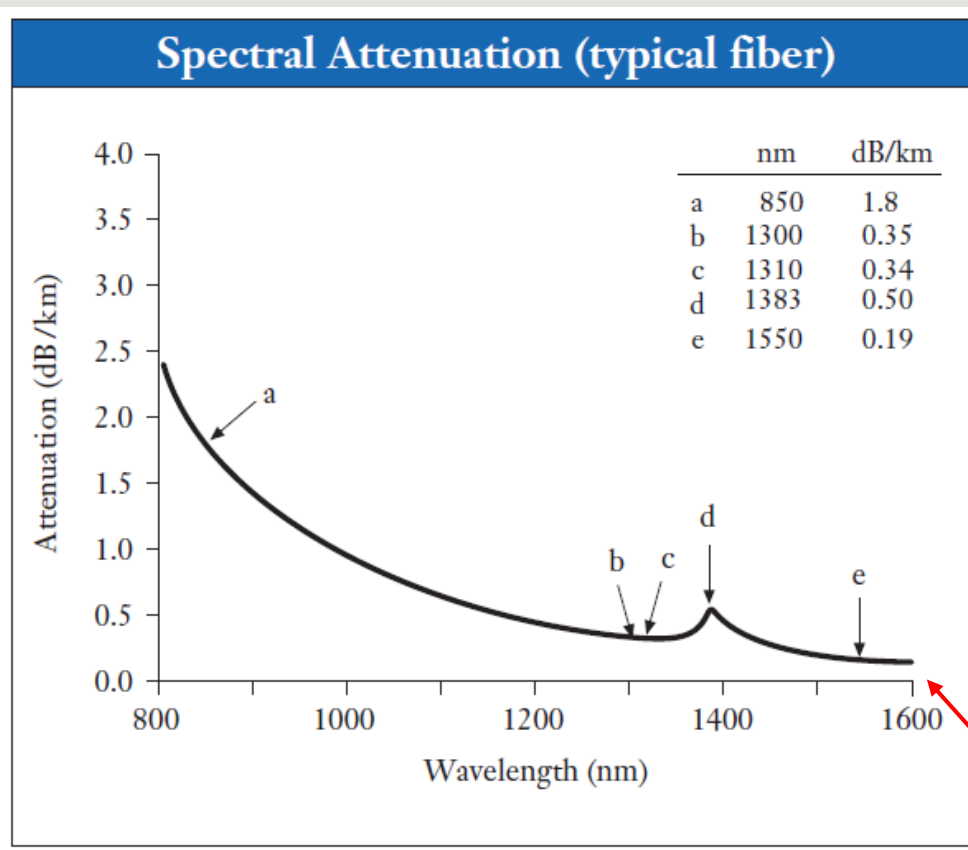
tłumienie światłowodu = absorpcja + rozpraszanie

$$\alpha = \alpha_A + \alpha_R$$

3 dB/km;	1 mW	100 km 	$1 \cdot 10^{-33}$ W	
0.4 dB/km;	1 mW	100 km 	0.1 μW	
0.2 dB/km;	1 mW	100 km 	10 μW	

Tłumienność światłowodu

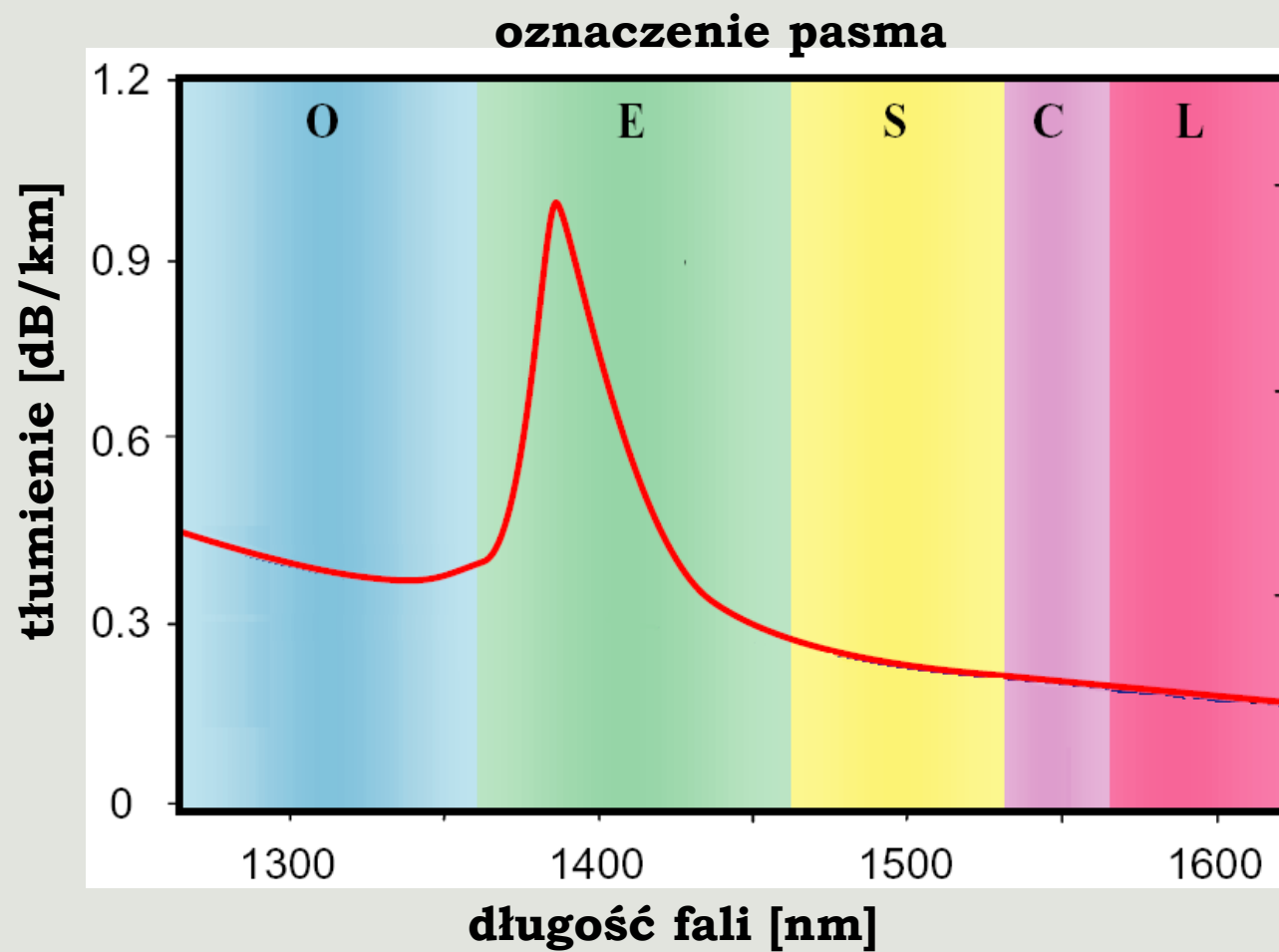




źródło: Corning, SMF-28

???

Tłumienność i pasma transmisyjne



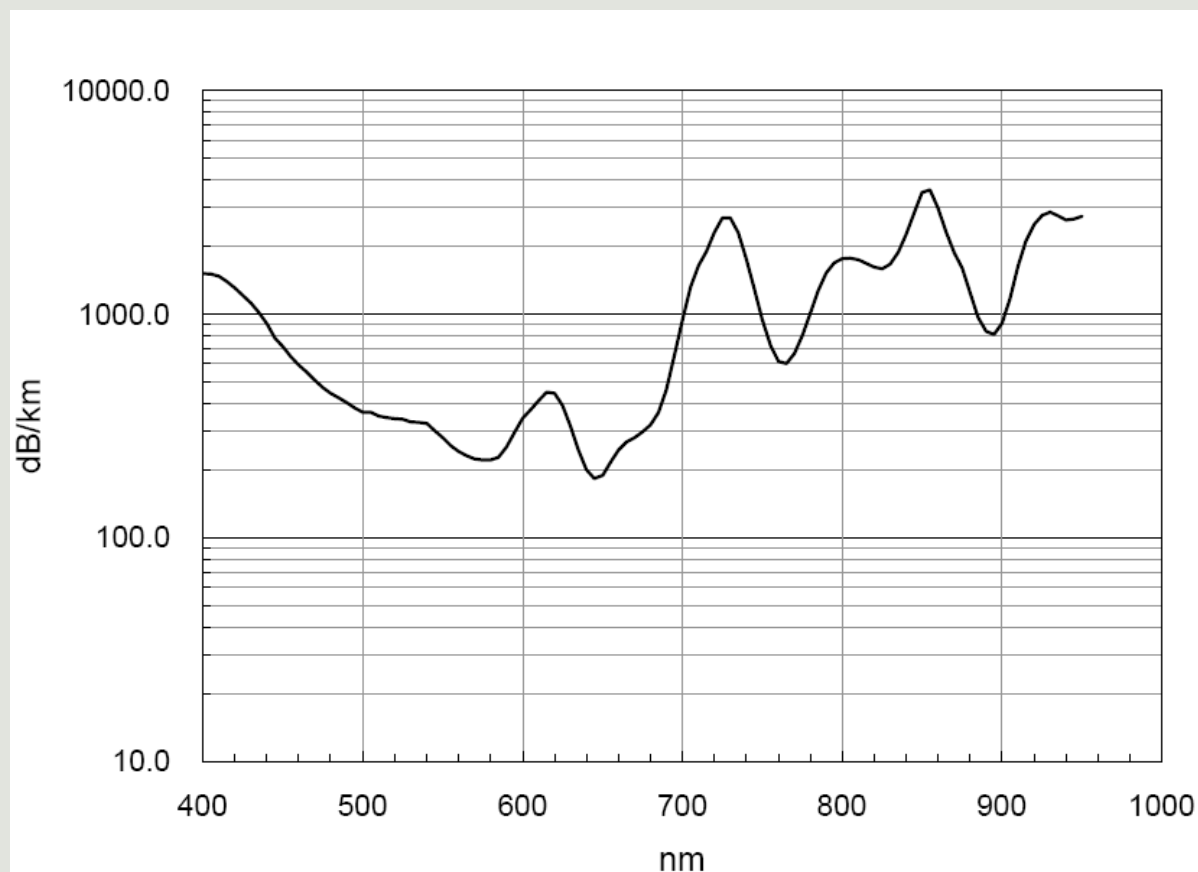
Światłowody plastikowe

POF – Plastic/Polymer Optical Fiber

rdzeń – PMMA – Polymethyl-Methacrylate (plexi)

polimery fluorowane (LUCINA fiber)

płaszcz – fluorowany PMMA



Światłowody plastikowe - przykłady

•Rdzeń skokowy

•*Mitsubishi ESKA*

•486/500 – 2944/3000; $\alpha \sim 200$ dB/km @ 650 nm

•*AsahiKasei*

•1000/2200; $\alpha \sim 150$ dB/km @ 650 nm

•Rdzeń gradientowy

•*FiberFin*

•675/750; $\alpha \sim 200$ dB/km @ 650 nm; pasmo > 1.5 GHz/100m

•Chromis Fiberoptic

•120/490; 50/490; $\alpha \sim 60$ dB/km @ 820 & 1300 nm

•Rdzeń jednomodowy

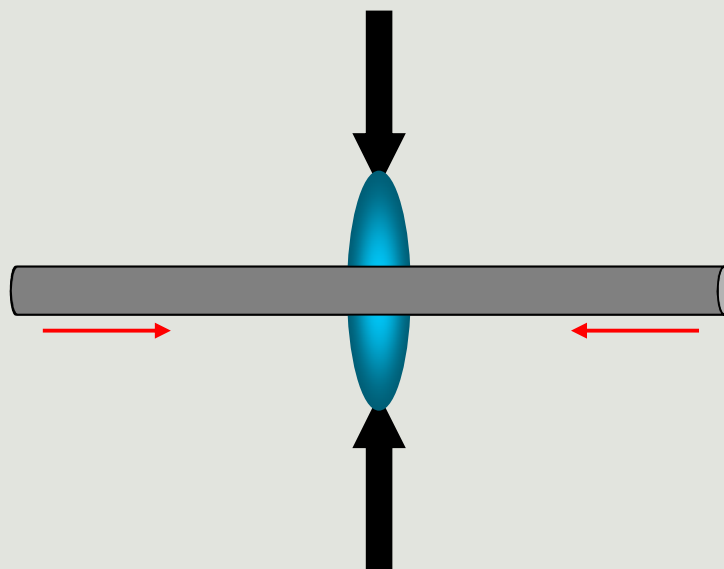
•Paradigm Optics

•3.13/115; 8/125

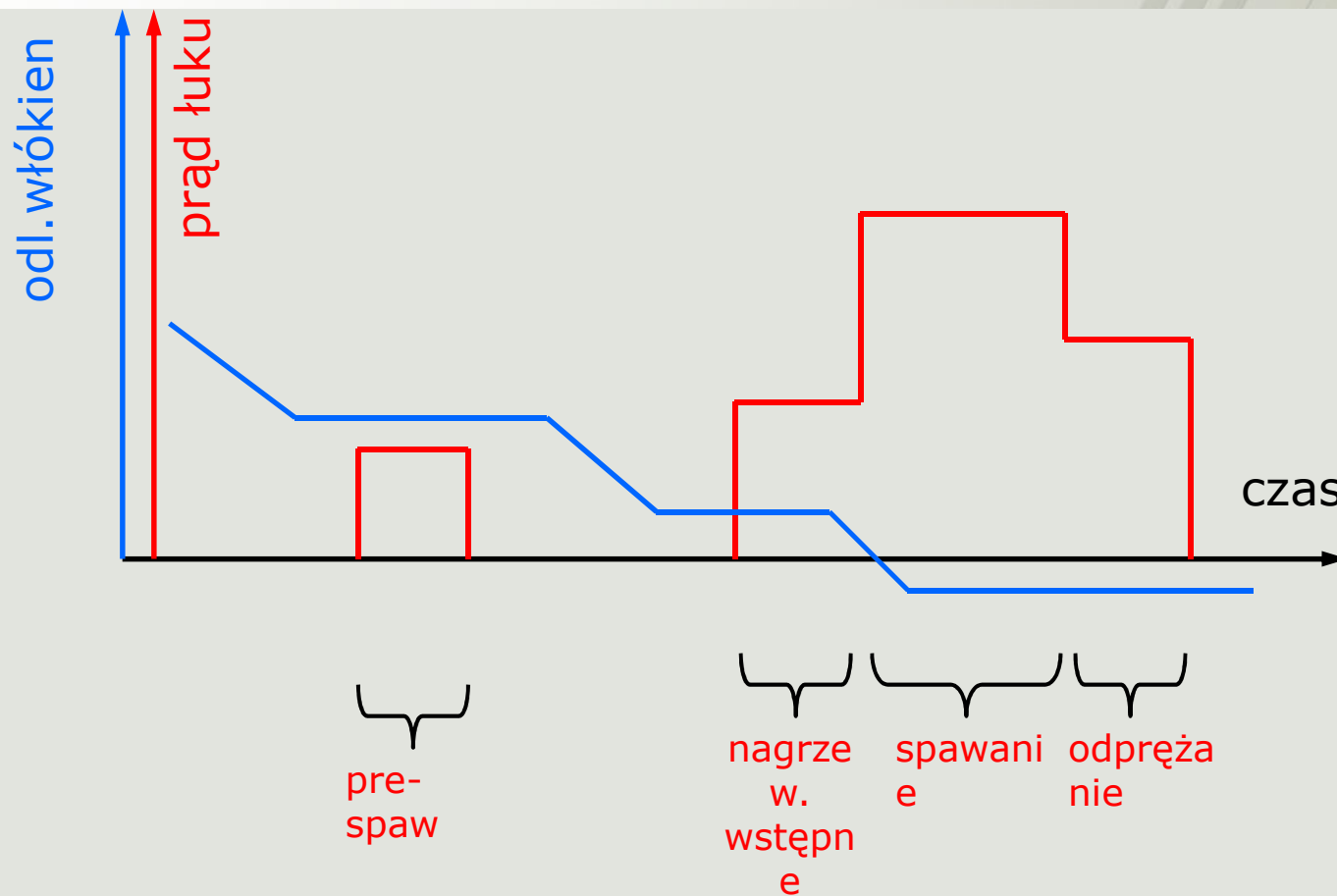
Przykładowe parametry światłowodów

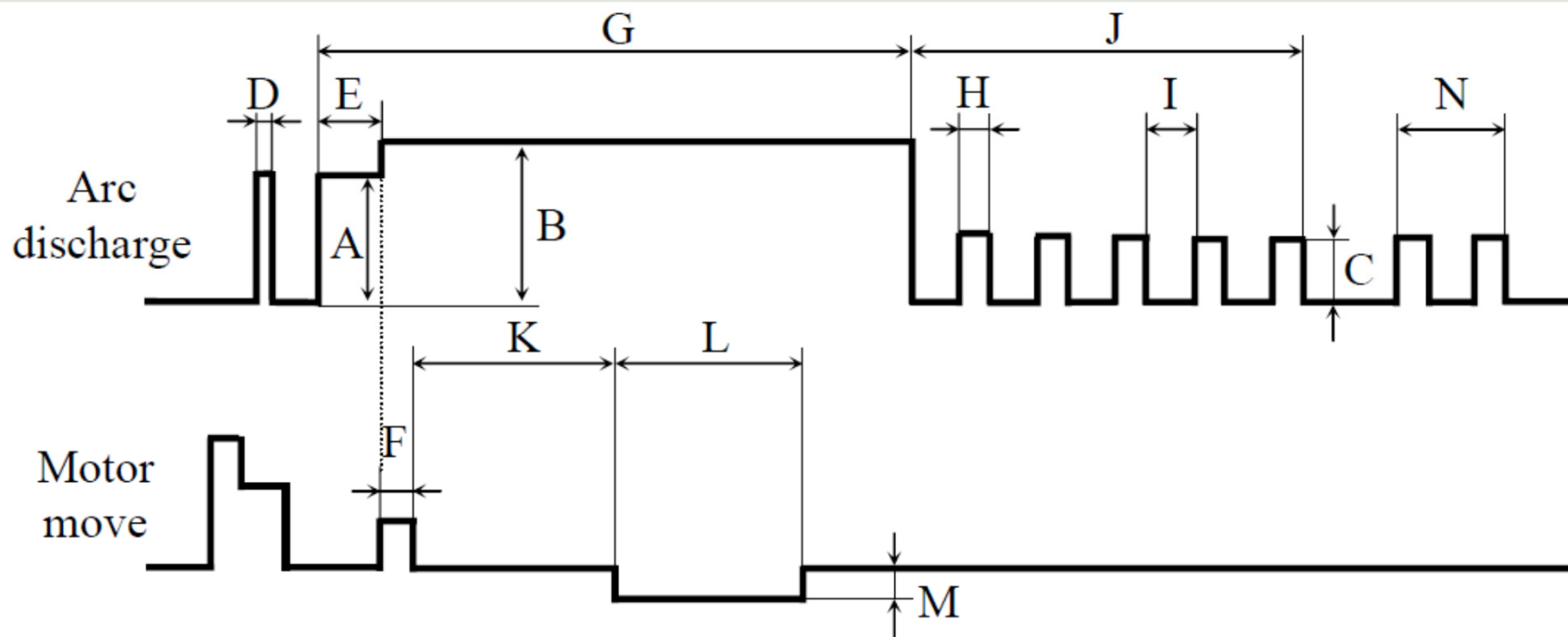
parametr	plastikowy	skokowy	gradientowy	jednomodowy	
długość fali [μm]	0.68	0.85 ÷ 1.3	0.85 ÷ 1.3	1.3	1.5
średn. rdzenia [μm]	500 ÷ 1000	50 ÷ 200	50 ÷ 100	10	10
średn. płaszcz [μm]		125 ÷ 380	125 ÷ 140	125	125
tłumienie [dB/km]	190	6	5 ÷ 1	0.35	0.22
NA	0.5	0.2 ÷ 0.4		0.1	0.1
cena [\$/km]			300	100	100

Idea spawania światłowodów:



Fazy spawania światłowodów





A: Prefuse Power,

D: Cleaning Arc,

F: Forward Time related to Overlap,

H: Arc2 ON Time,

K: Taper Wait Time,

M: Taper Speed,

B: Arc1 Power,

E: Prefuse Time,

I: Arc2 OFF Time,

L: Taper Time related to Taper Length,

N: Rearc Time

C: Arc2 Power,

G: Arc1 Time,

J: Arc2 Time,

Kryteria jakości spawu:

- tłumienie $\sim 0,01 \dots 0.05$ dB
- wytrzymałość mechaniczna

czynniki związane z włóknem:

- | | | |
|------------------------------|---|----|
| - zgodność średnic rdzeni | } | MM |
| - zgodność NA | | |
| - zgodność profili | | |
| - koncentryczność | | |
| | | |
| - zgodność średnic pola modu | } | SM |
| - koncentryczność | | |

czynniki związane z procesem spawania:

- prostopadłość cięcia
- pozycjonowanie włókien
- zanieczyszczenia
- czasy trwania i prądy łuku w kolejnych fazach