



POZNAŃ SUPERCOMPUTING AND NETWORKING CENTER

# Nowoczesne Sieci Komputerowe

## Światłowody... i systemy transmisyjne

**Piotr Turowicz**

piotrek@man.poznan.pl

Poznańskie Centrum Superkomputerowo- Sieciowe

## Co będzie...

- Wykorzystanie pasma – Multipleksacja
- DWDM i CWDM
- Zjawisko dyspersji w światłowodzie (CD i PMD)
- Sieci optyczne nowych generacji – sieci 100G +
- Transmisja koherentna
- Wzmacniacze światłowodowe

## Sieci optyczne – Wyzwania i rozwiązania

### **Wyzwania:**

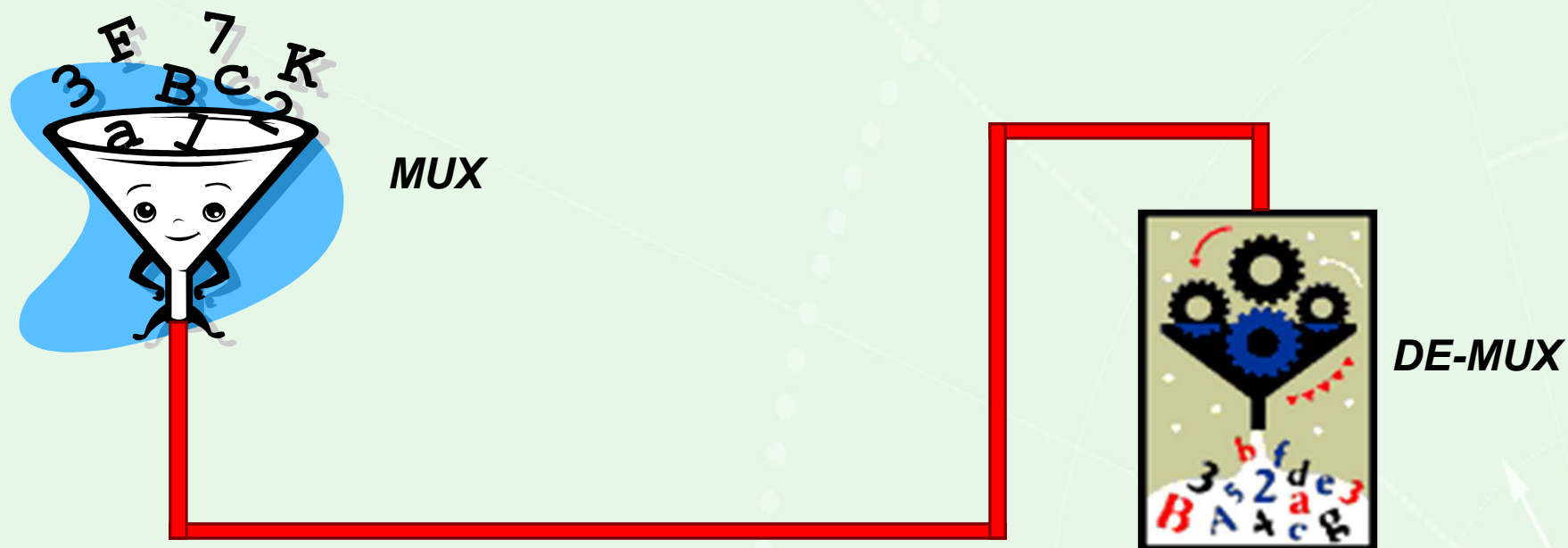
- Usługi są nieprzewidywalne jeśli chodzi o wykorzystanie pasma i wymagania dotyczące routingu
- Zestawienie połączenia szerokopasmowego do każdego węzła
- Przewidywania – dostęp do wszystkich treści na żądanie, w dowolnym czasie i z dowolnego miejsca
- W nieprzewidywalnym środowisku biznesowym – dostarczenie wszystkich usług ASAP 😊

### **Rozwiązania:**

- Sieci nowej generacji – możliwości rekonfiguracji i skalowalna warstwa optyczna,
- Sieci elastyczne - Gridless
- Elementy ROADM – Reconfigurable Optical Add/Drop MUX
- Architektura Colorless, Directionless, Contentionless

## Multipleksowanie kanałów

Optymalizacja medium jest realizowana przez multiplikację (MUX) i de-multiplikację (DE-MUX)



## TDM – Time Division Mux

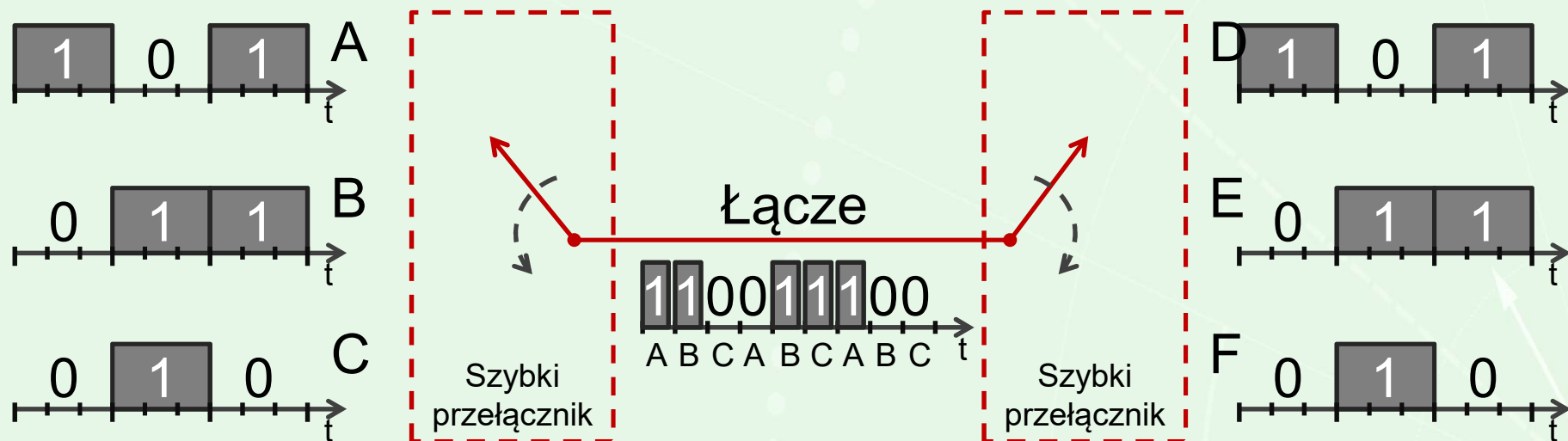
### Multipleksacja w dziedzinie czasu

- Przyporządkowanie każdemu strumieniowi danych szczelin czasowych

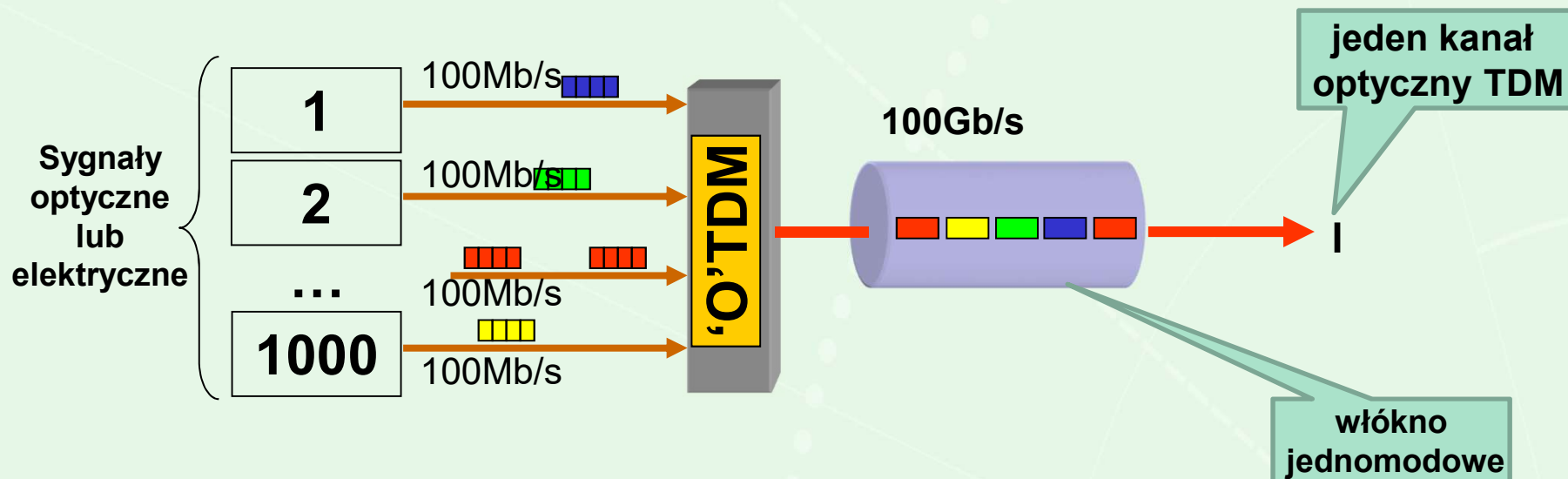
Wykorzystywany do transmisji głosu

Szybkość transmisji w sieciach SDH OC 48 (2.5Gbps)

Teoretyczne rozszerzenie do OC 192 (10Gbps) i nawet OC 768 (40Gbps)

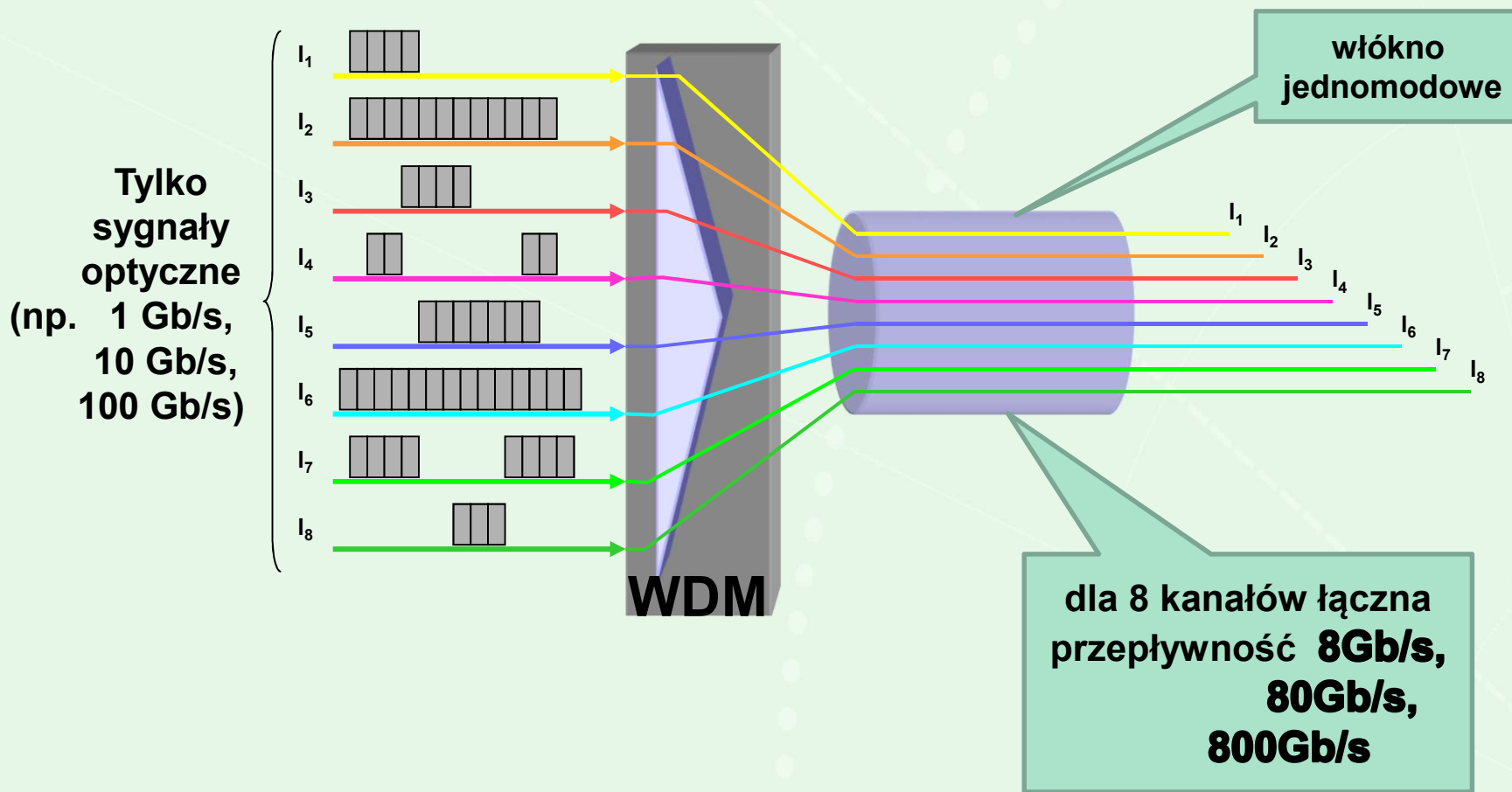


## Zwielokrotnienie czasowe

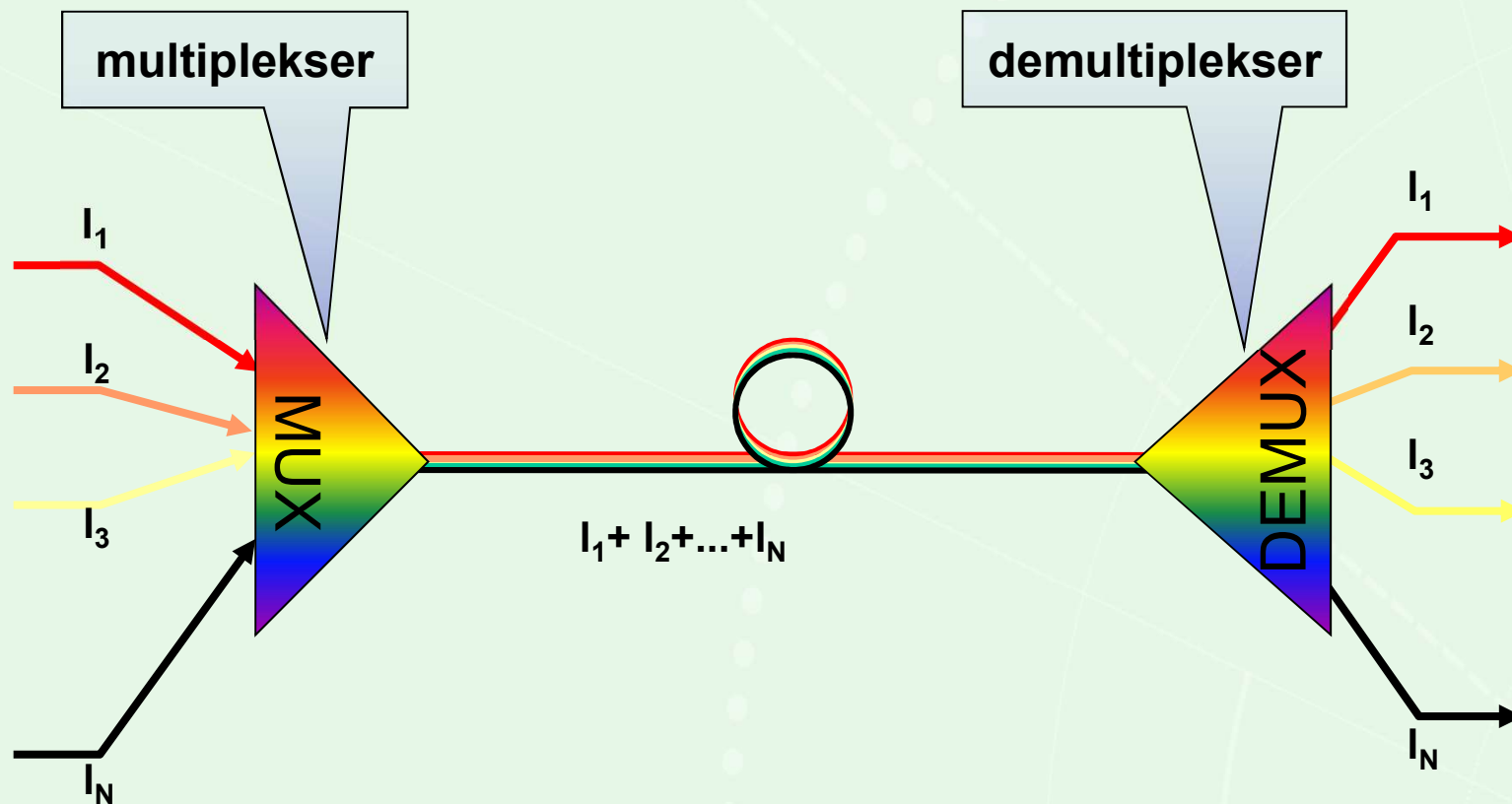


# Zwielokrotnienie falowe

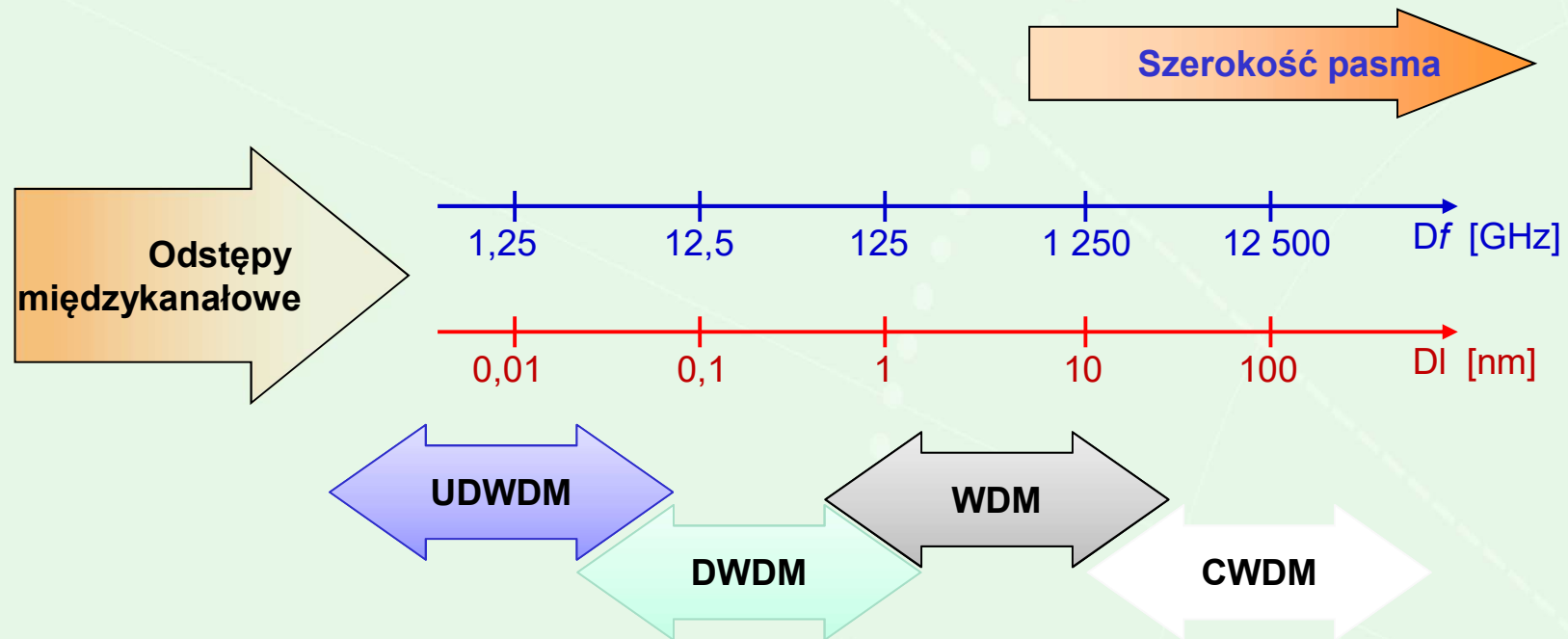
## WDM - Wavelength Division Multiplexing



## WDM – konfiguracja podstawowa



# Klasyfikacja WDM



## **CWDM**

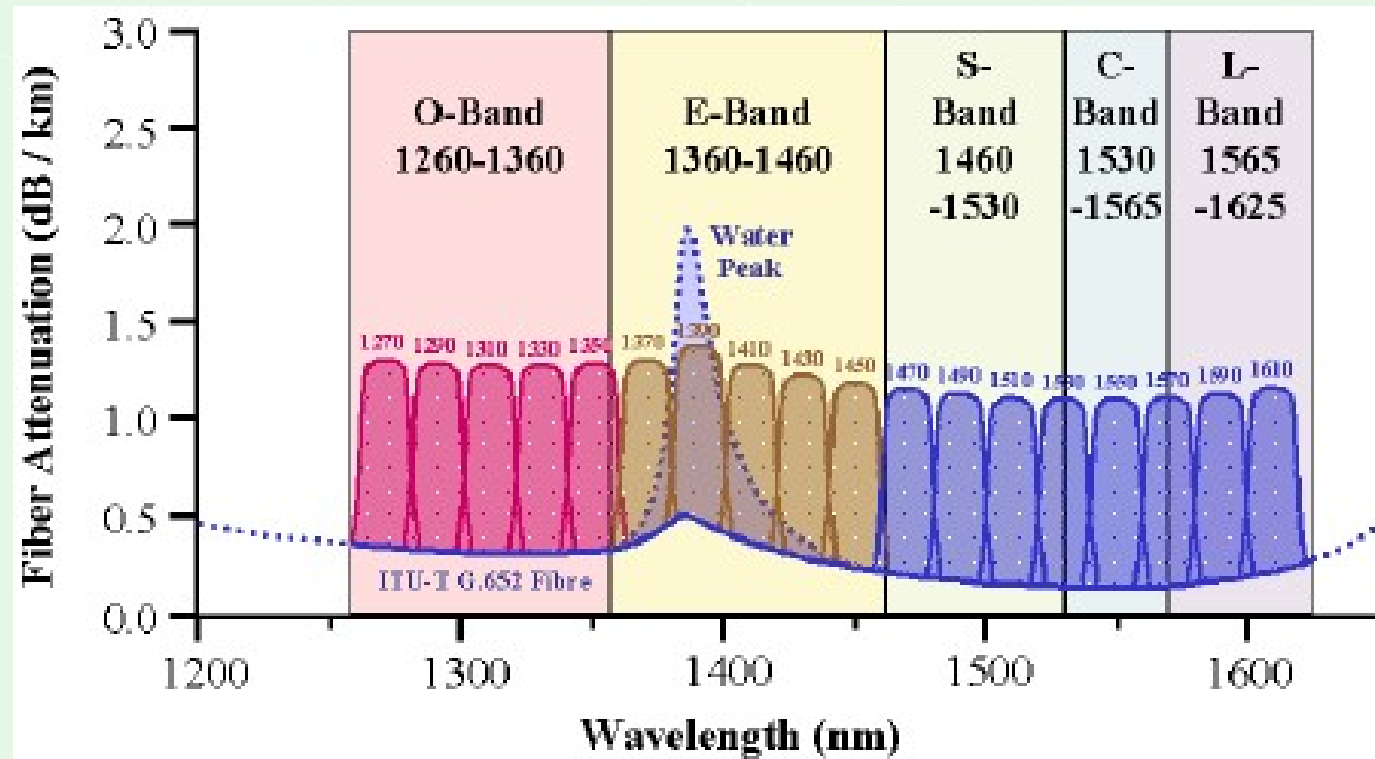
### **Coarse Wavelength Division Multiplexing**

Ogólnie - Jest to metoda transmisji we włóknie optycznym, polegająca na łączeniu wielu sygnałów nadawanych we włóknie światłowodowym na wielu długościach fal z tym że, są one spektralnie dużo szersze, a przez to ich liczba jest mniejsza niż w systemie DWDM

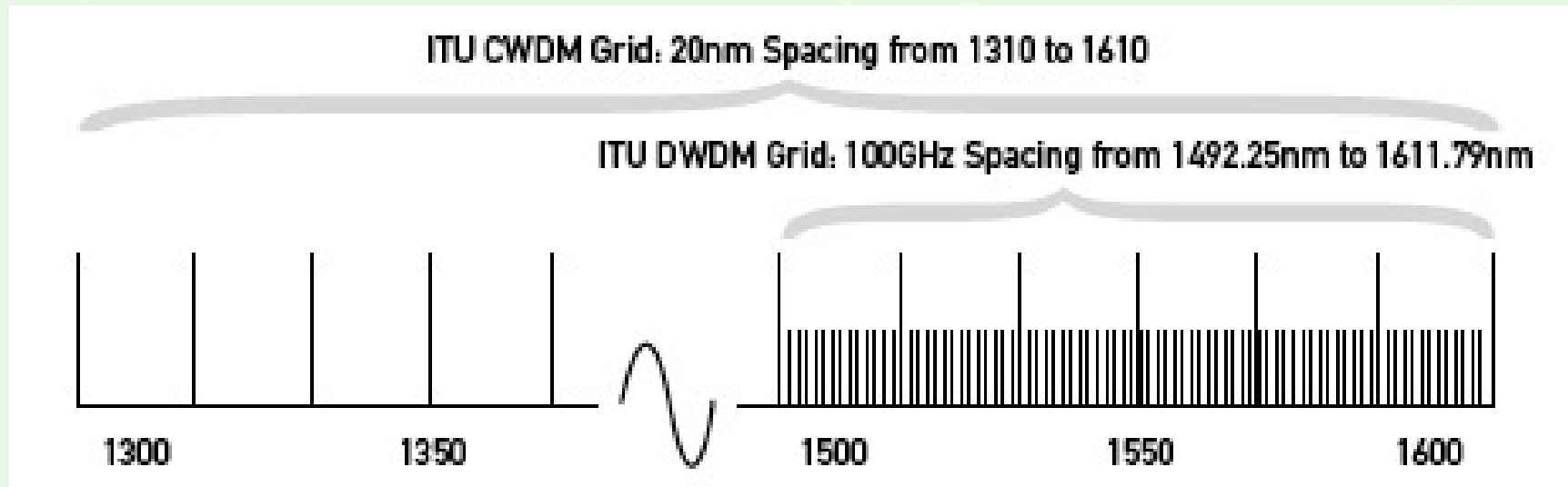
## CWDM

- systemy CWDM posiadają kanały oddalone od siebie o 20 nm (w porównaniu z odległością 0,8 nm lub 0,4 nm dla systemów DWDM)  
Pozwala to na użycie tanich, niestabilizowanych temperaturowo laserów dla systemów CWDM.
- W typowym systemie CWDM, lasery pracują na ośmiu kanałach, na ośmiu zdefiniowanych długościach fal [nm]:  
1610, 1590, 1570, 1550, 1530, 1510, 1490, 1470.
- Jednak możliwa jest transmisja większej liczby kanałów w zakresie długości fal 1270 nm 1625 nm (likwidacja piku OH<sup>-</sup>)

## CWDM – siatka kanałów

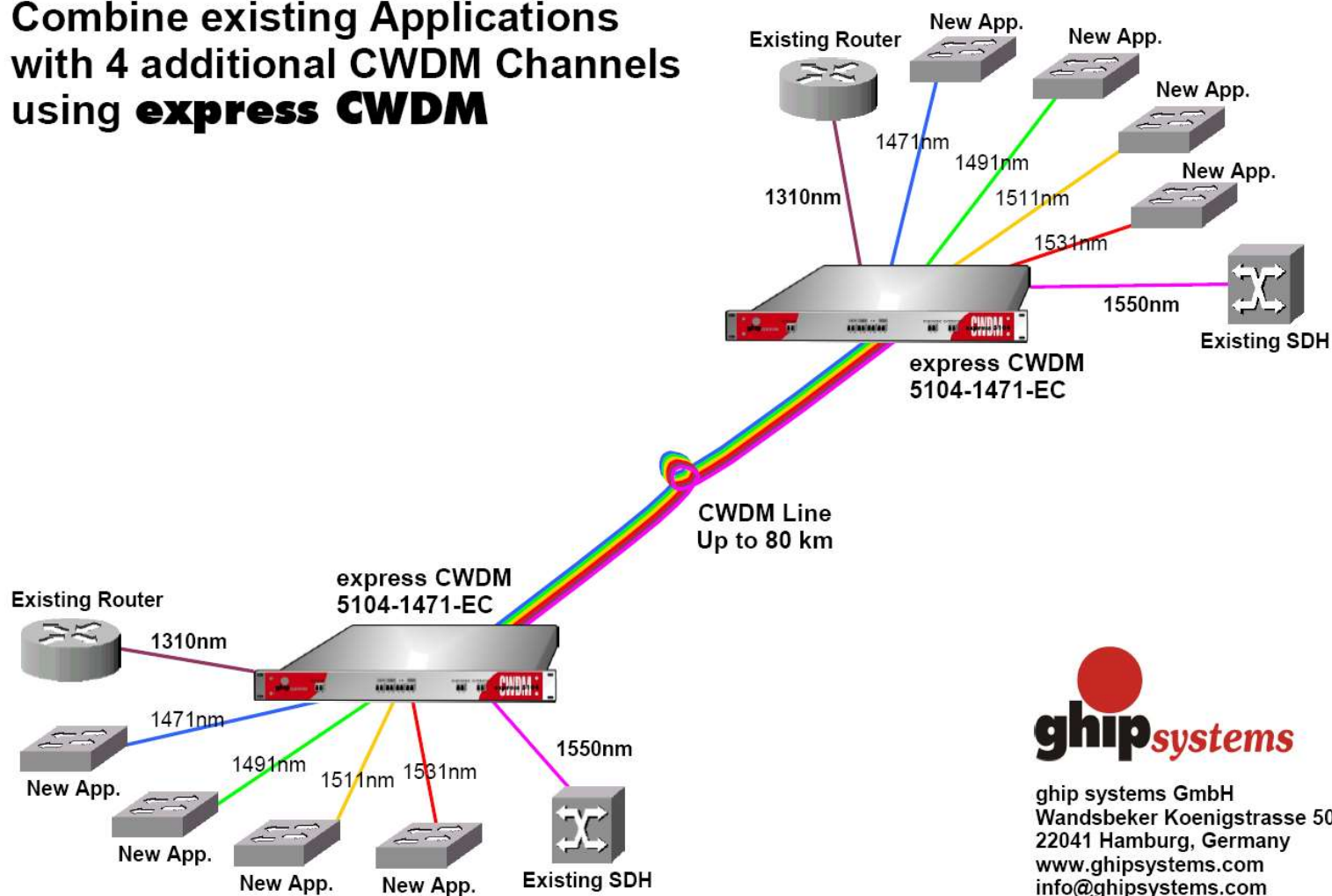


## CWDM vs. DWDM



# CWDM

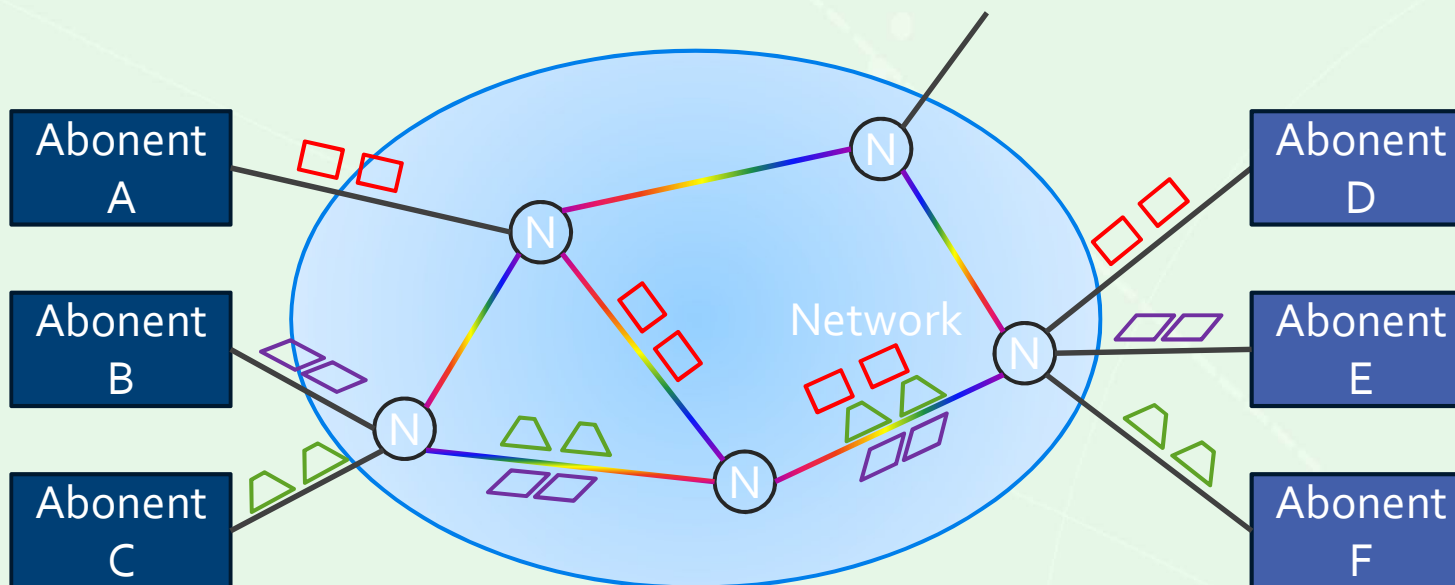
Combine existing Applications with 4 additional CWDM Channels using **express CWDM**



ghip systems GmbH  
Wandsbeker Koenigstrasse 50  
22041 Hamburg, Germany  
www.ghipsystems.com  
info@ghipsystems.com

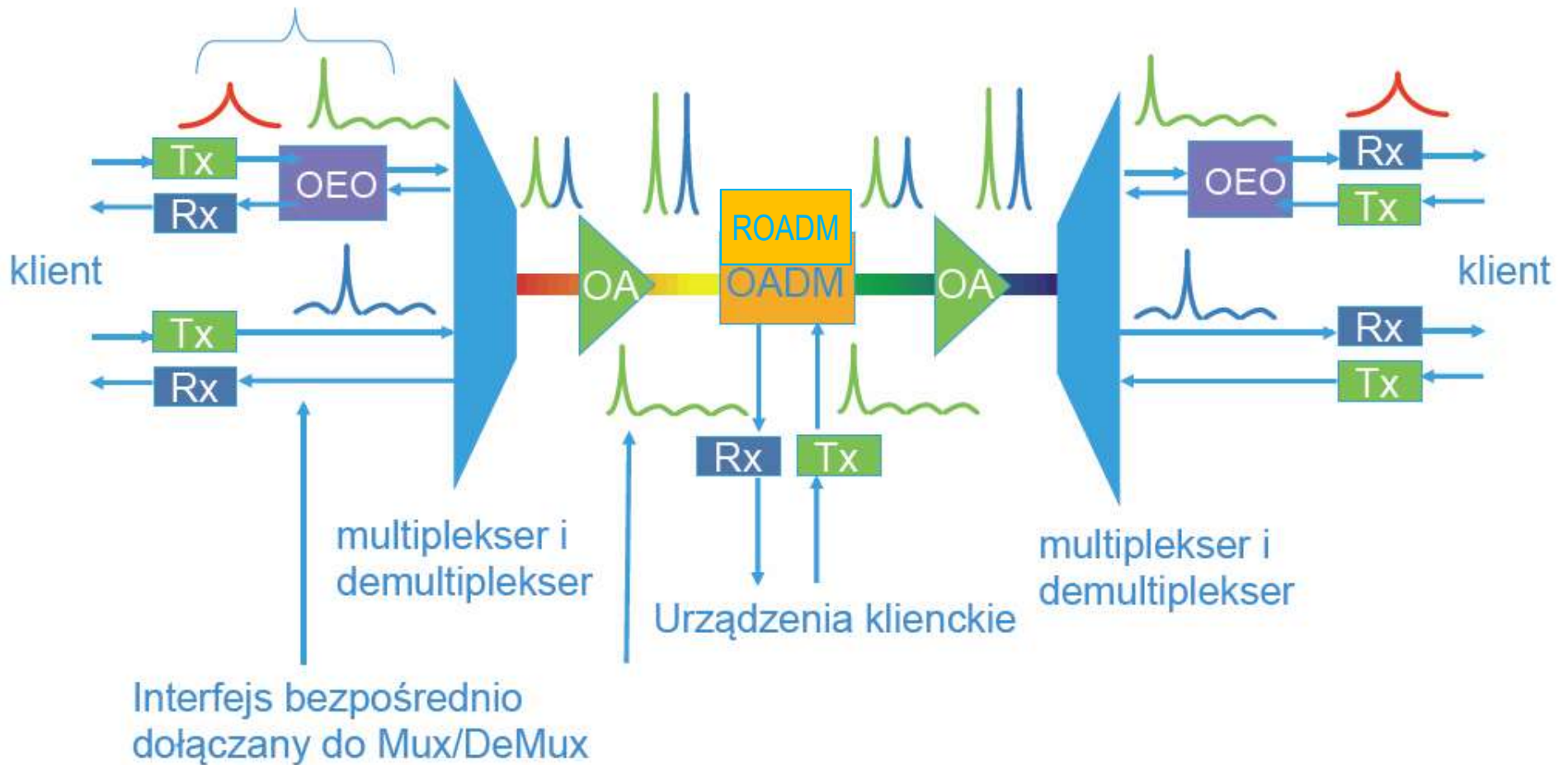
## System transmisyjny

- Metody transmisji informacji przez sieć WDM
  - Przesyłanie pakietów informacji



# System DWDM - komponenty

Interfejsy transpondera



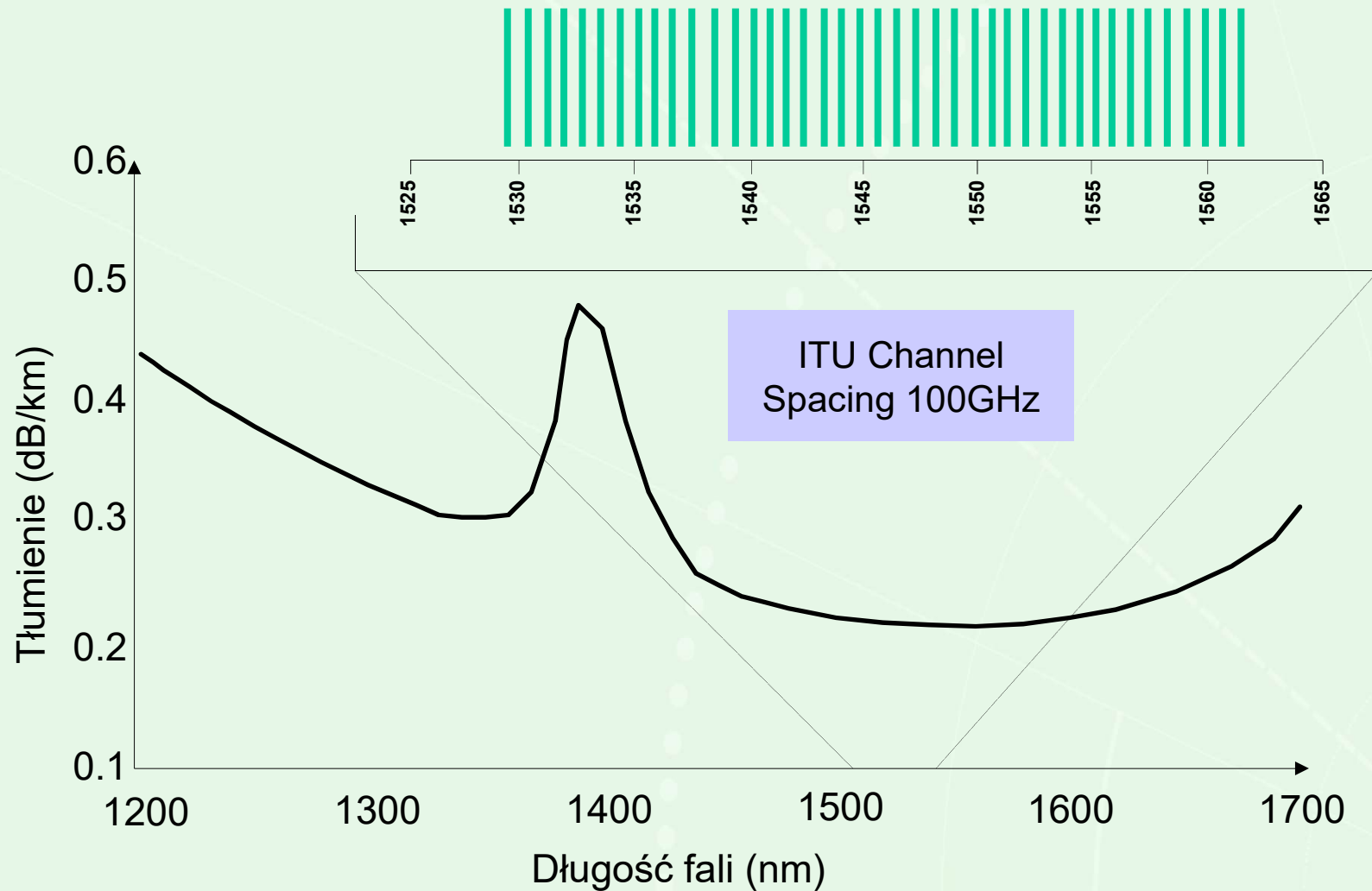
# Pytanie...

*Dlaczego strumienie na  
różnych długościach fal  
nie “mieszają się”?*

# Odpowiedź

- ❑ Światło jest wysyłane do włókna w bardzo wąskim zakresie długości fali
  - typowe lasery DFB mają prążek widmowy o szerokości  $\sim 10\text{MHz}$  ( $\sim 80\text{ fm}$  dla  $1550\text{nm}$ ).
  
- ❑ Różne kanały są oddalone, tak że one nie nakładają się wzajemnie
  - w tym kontekście, "nakładanie" wpływa na *łączenie mocy optycznych* (np. interferencja) pomiędzy sąsiednimi kanałami
  - kiedy zwiększa się prędkość transmisji lub liczbę kanałów, konieczne jest również zwiększenie budżetu transmisji
  - Stosuje się tzw pasma ochronne
  
- ❑ Trzeba znać zakres dostępnych długości fal we włóknie światłowodowym

# Dense WDM



## Odległości między kanałami w DWDM

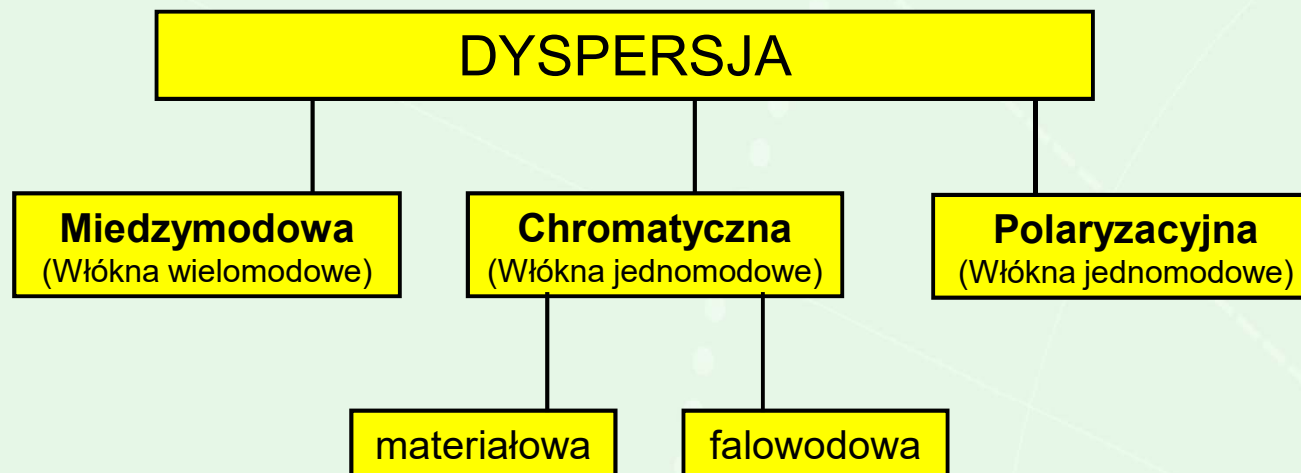
- ❑ Kanał musi mieć wystarczającą przestrzeń by zapobiegać interakcji przy danej szybkości transmisji...
  - 100 GHz (0,8 nm) standardowa siatka ITU
  - 50 GHz (0,4 nm) zagęszczenie do 88 kanałów
  - 12,5 GHz agregacja w „super channel” dla rozwiązań flex-grid
  
- ❑ Lasery muszą odpowiednio dobrane, zapewnić stabilność temperaturową, oraz uwzględnić margines na starzenie się elementów
  
- ❑ Cały zakres długości fal musi być spójny i w pełni obsługiwany przez EDFA/RAMAN w zakres pracy: 1530 - 1565 nm (pasmo C)
  
- ❑ Trzeba wziąć pod uwagę ograniczenia samego włókna

## DWDM dostępne elementy i technologie

- Zastosowanie laserów jako źródeł nadajników optycznych
- Włókna: o niskiej tłumienności, włókna specjalne (DCF, NZDSF)
- Strojone filtry optyczne
- Siatki Bragga
- Sprzęgacze długości fali, mux/dmux optyczne
- Optyczne przełączniki - WSS i multiplexery - ROADM
- Wzmacniacze optyczne (EDFA, Raman)
- Elastyczność sieci poprzez zastosowanie w sieci elementów:
  - Optical Cross-Connect (OXC)
  - Optical Add-Drop Mux (OADM)
  - Reconfigurable Add-Drop Mux (ROADM)
- Zastosowanie nowych formatów modulacji i kodowania
- Systemy koherentne

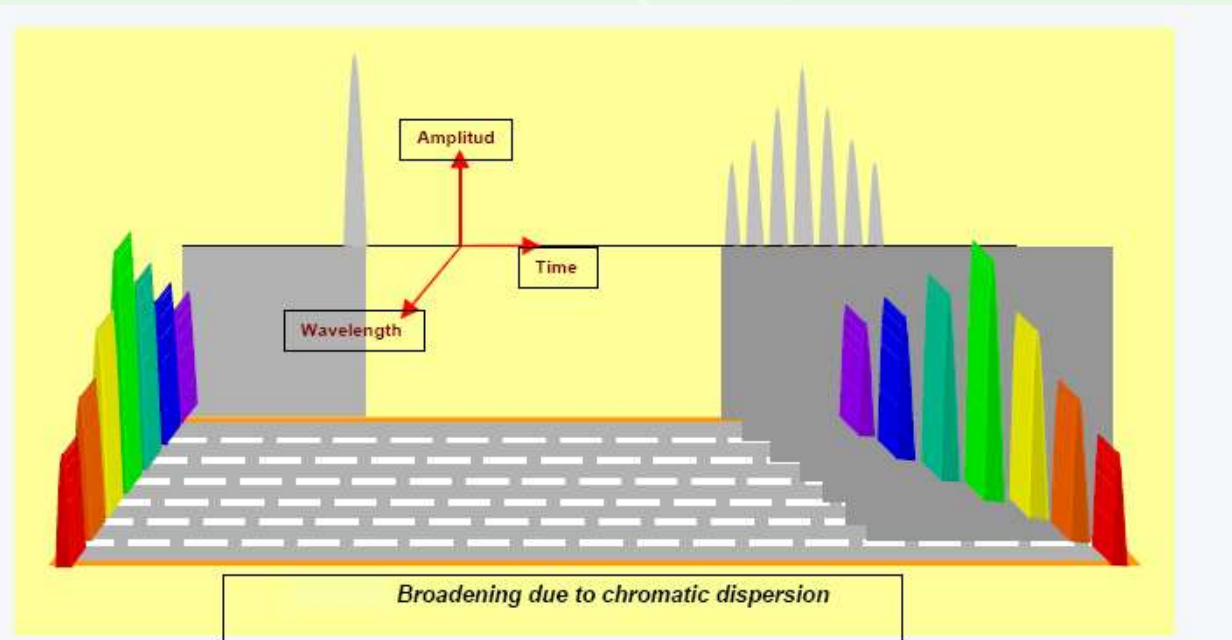
## Właściwości włókna światłowodowego

Przez dyspersję rozumiemy zależność parametrów ośrodka od częstotliwości (długości fali) światła.



## Dyspersja chromatyczna

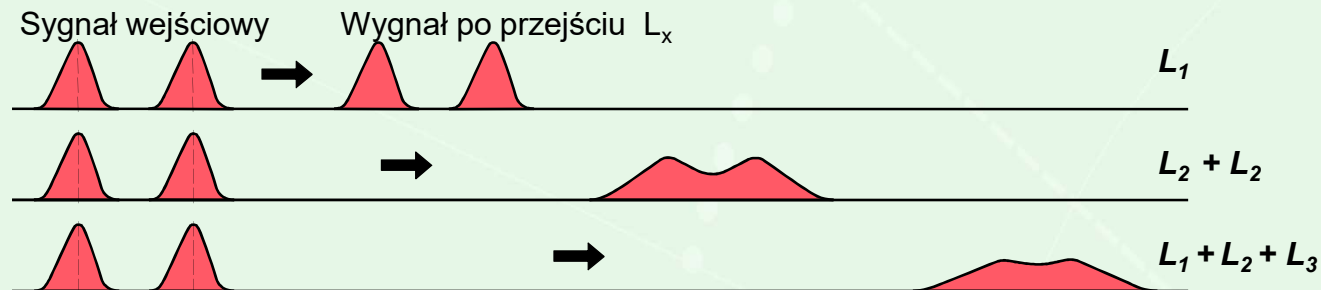
Poszerzenie impulsu optycznego we włóknie, powstające w wyniku różnic prędkości grupowych różnych fal składających się na szerokość spektralną źródła światła.



In a positive dispersion fibre, short (blue) wavelengths arrive before long (red) wavelengths. Because laser light sources are not monochromatic, pulse spreading occurs.

## Właściwości włókna światłowodowego (SM) - Dyspersja

W dyspersji są wszystkie efekty, które wydatnie wpływają na poszerzenie impulsu oraz na jego „spłaszczenie”



Dyspersja powiększa się wraz z długością włókna i/lub wyższą przepływnością sygnału.

## Dyspersja chromatyczna

Dyspersja chromatyczna wywołana jest następującymi czynnikami:

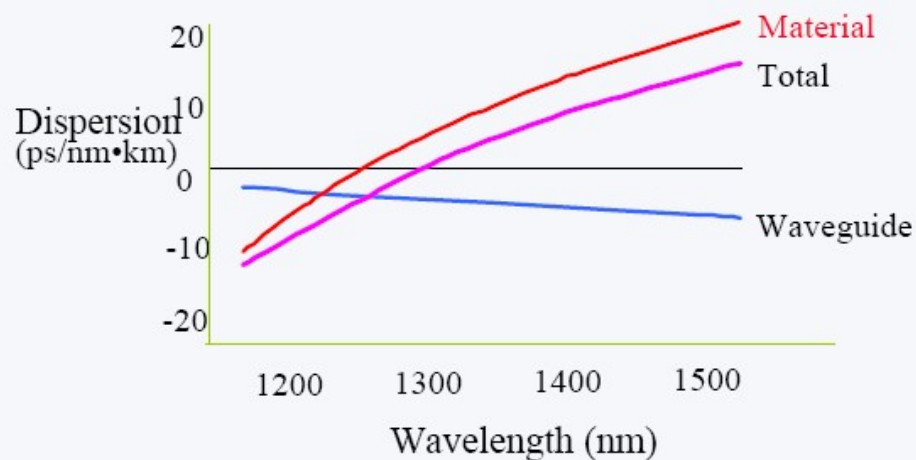
- ***dyspersja materiałowa***

Zależy od użytego materiału z określonym współczynnikiem załamania światła, którego nie możemy zmienić w danym światłowodzie

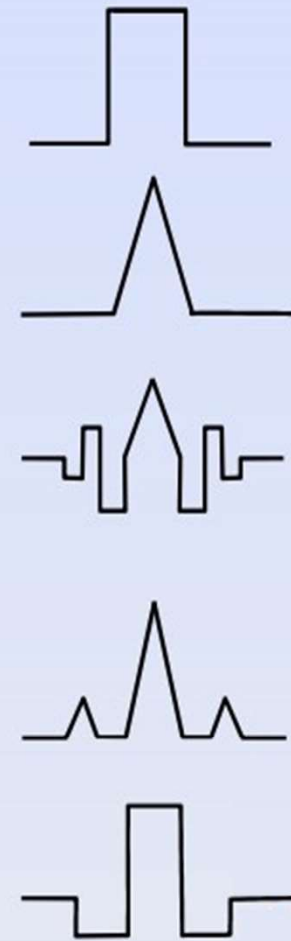
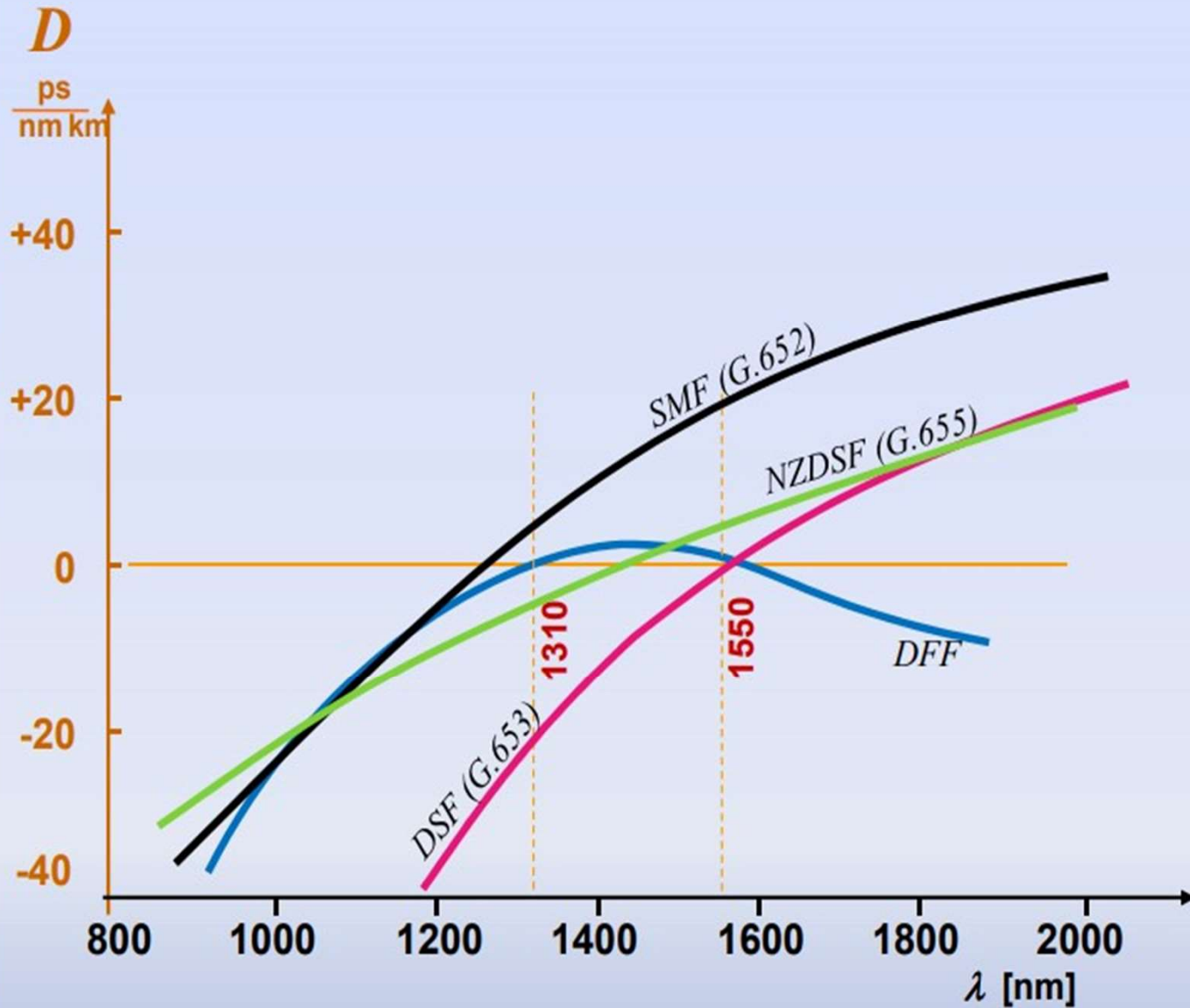
- ***dyspersja falowodowa***

Jest efektem przenikania części światła do płaszczka włókna światłowodowego. Zależy profilu współczynnika załamania światła lecz ten parametr może być modyfikowany, pozwalając na wykonanie specjalnego włókna z określoną charakterystyką dyspersji.

## Dyspersja chromatyczna



Przez zmianę dyspersji falowodowej (np. zmieniając kształt współczynnika załamania włókna) oraz zrównoważenia jej dyspersją materiałową (stałą), charakterystyka dyspersji włókna może być zmieniana do wymaganych wartości dla określonego okna transmisyjnego



## Współczynnik dyspersji chromatycznej

Zwykle wielkość dyspersji podaje się w **ps/(nm·km)**

Zmiana opóźnienia impulsu światła na jednostkową długość światłowodu wywołana przez jednostkową zmianę długości fali światła.


Miarą dyspersji będzie czas trwania impulsu światła, przypadający na jednostkę widma, po przejściu jednostkowej długości światłowodu.



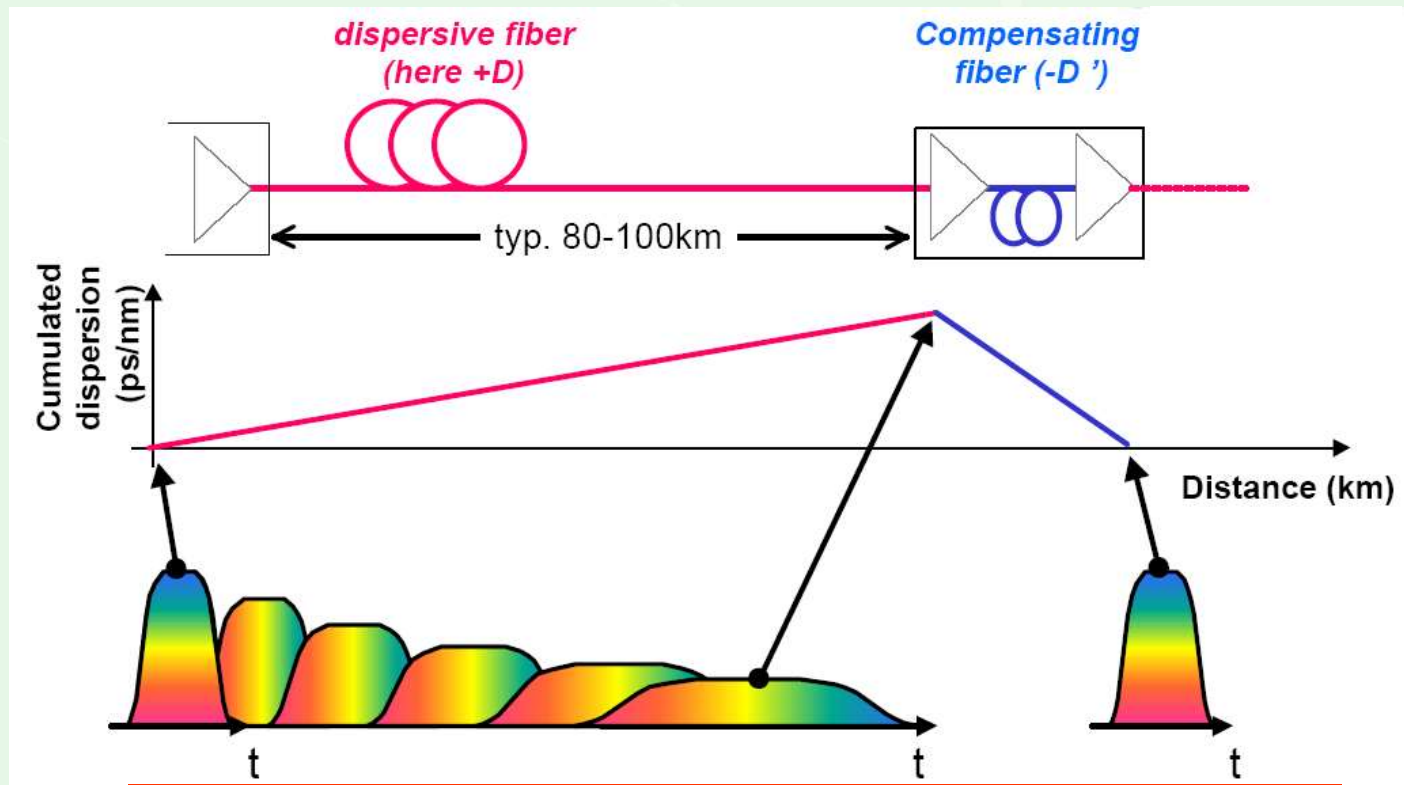
## Cechy dyspersji chromatycznej

---

### Dyspersja chromatyczna

- Jest deterministyczna
- Jest liniowa
- Jest niezmienna przez otoczenie (temp., warunki instalacji, itp.)
- Może być kompensowana 

## Zarządzanie dyspersją chromatyczną



## Dyspersja chromatyczna

Szybkości transmisji wzrastają.

Przekroczenie dopuszczalnej dyspersji w odbiorniku powoduje pogorszenie parametrów systemu.

Szybkość	SDH	SONET	CD
2,5 Gbit/s	STM -16	OC-48	12000-16000 ps/nm
10 Gbit/s	STM -64	OC-192	800-1000 ps/nm
40 Gbit/s	STM -256	OC-768	60-100 ps/nm

Wartości zależne od szerokości spektralnej lasera, typu modulacji i czułości odbiornika

Np. tor optyczny: 80 km,

włókno: SMF 17ps/nm km @1550 nm

$CD = 80 \times 17 = 1360$  ps/nm

przy 10G+ konieczna jest kompensacja CD toru optycznego.

**Aby dobrać kompensator CD trzeba  
wykonać pomiar dyspersji całego toru.**

## Ogólna zasada kompensacji dyspersji chromatycznej

---

$$D_1 L_1 - D_k L_k = 0$$

Gdzie:

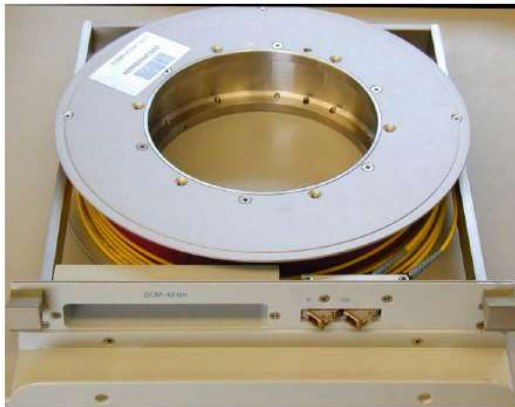
$D_1$  i  $L_1$  współczynnik dyspersji chromatycznej i długość światłowodu roboczego,

$D_k$  i  $L_k$  współczynnik dyspersji chromatycznej i długość światłowodu kompensującego.

---

## Moduł DCM (DCF)

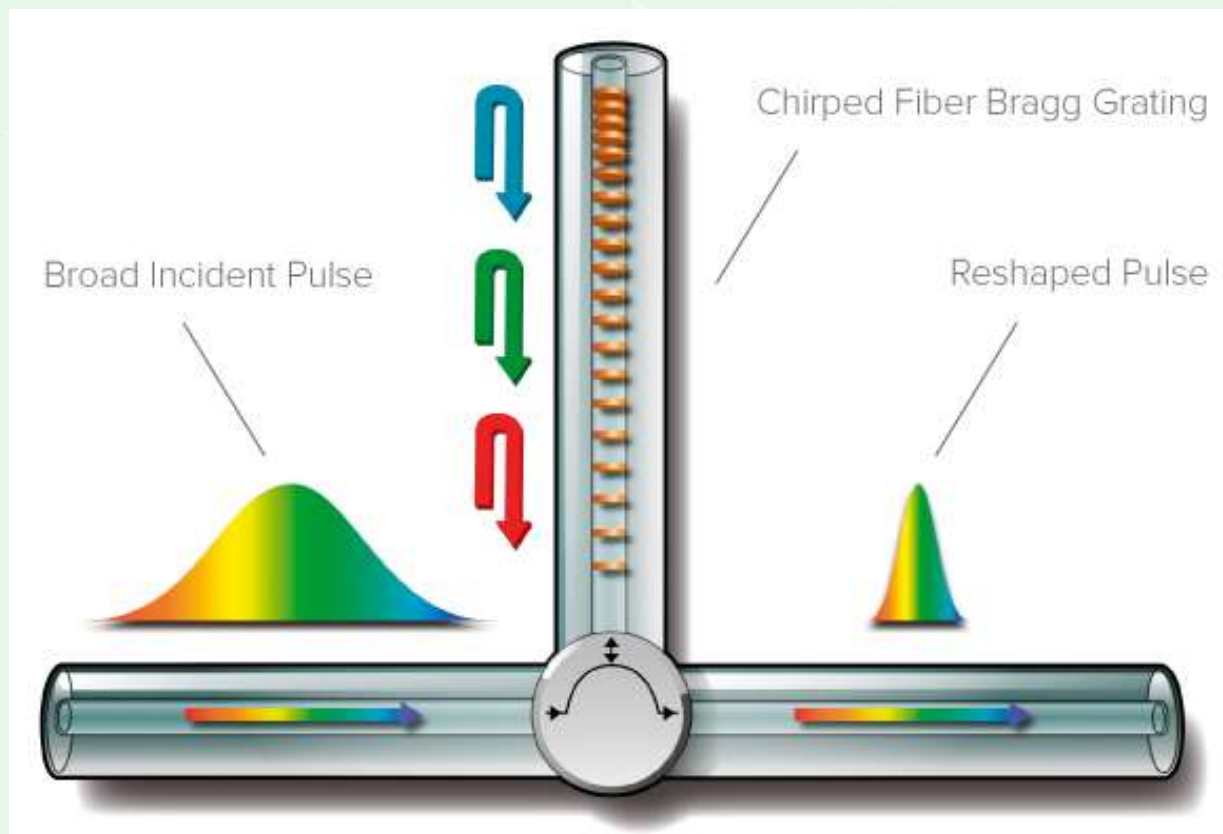
### DCM-P/xx



- ▶ Designed for G652 fibers only
- ▶ 3 Variants
  - ▶ DCM-P/20
  - ▶ DCM-P/40
  - ▶ DCM-P/80

Variants	Attenuation	Latency	compensated fiber length
DCM-P/20	4,0 dB	25 $\mu$ s	18 km
DCM-P/40	5,5 dB	50 $\mu$ s	38 km
DCM-P/80	8,6 dB	100 $\mu$ s	78 km

# Kompensator CD siatka Bragga



Źródło: POXIMON

## Kompensator CD

### DCG50-M/xxx/SSMF



- ▶ Chirped fiber Bragg Grating on 50GHz grid in C-Band
- ▶ Compensate SSMF reduced slope fiber
- ▶ Latency comparison
  - ▶ DCG 60km <math>< 0.05\mu\text{s}</math> – 100km <math>< 0.05\mu\text{s}</math>
  - ▶ DCF 10km <math>< 5\mu\text{s}</math> – 100km <math>< 50\mu\text{s}</math>
- ▶ Maximum per channel input power to the DCM 0dBm
- ▶ Not a direct replacement for DCF
- ▶ 1 slot width

DCG variants SSMF {  
 DCG50-M/060/SSMF/50GHz  
 DCG50-M/080/SSMF/50GHz  
 DCG50-M/100/SSMF/50GHz

XXX	IL	latency
60	4 dB	.05 $\mu\text{s}$
80	4 dB	.05 $\mu\text{s}$
100	4 dB	.05 $\mu\text{s}$

## CD podsumowanie

---

Zbyt duża dyspersja w systemie będzie prowadzić do pogorszenia parametrów i kiepski QoS -> BER

Zerowa wartość CD w systemie DWDM prowadzi do zaburzeń z powodu zjawisk nieliniowych we włóknie m.in. mieszania czterofalowego (ang. Four Wave Mixing).



## Dyspersja polaryzacyjna

---

**PMD - Polarisation Mode Dispersion**

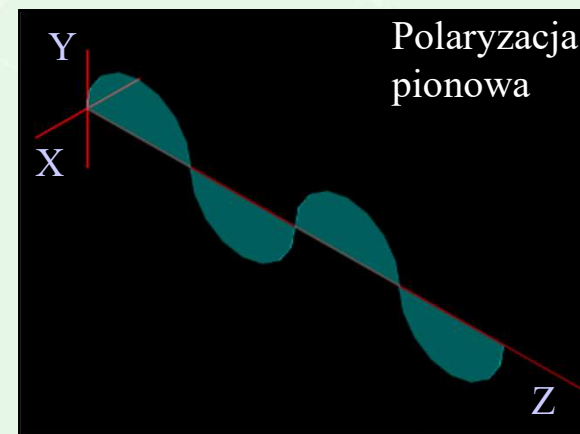
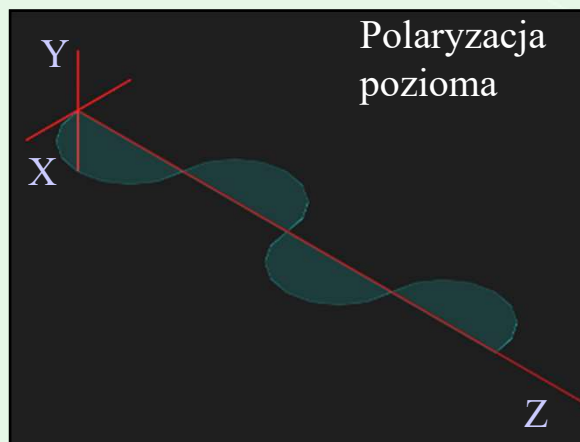
## Dyspersja polaryzacyjna

Spolaryzowane światło we włóknie może być opisane jako:

Poziomy stan polaryzacji – wzdłuż osi X-Z

Pionowy stan polaryzacji – wzdłuż osi Y-Z

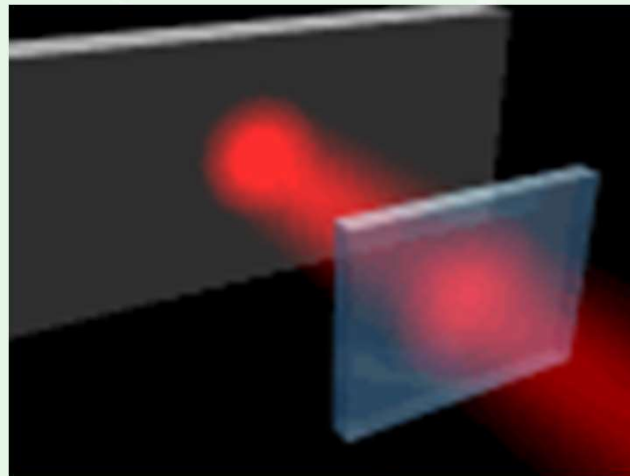
Dla światła spolaryzowanego, te dwa stany (mody) są propagowane wzdłuż włókna. Są one ortogonalne i nie zakłócają się.



## Główny stan polaryzacji - PSP

---

Pole elektryczne ( $\vec{E}_0$ ) jest sumą wektorów dwóch składowych (wektor  $\vec{E}_{0x}$  i wektor  $\vec{E}_{0y}$ ), zwane jako **główny stan polaryzacji** Principal State of Polarization (PSP).



## Dwójłomność włókna

W związku z fizycznymi właściwościami włókna (geometria, zmienność IOR, ośrodek dwójłomny) składowe PSP poruszają się wzdłuż osi propagacji (Z) z różną prędkością.

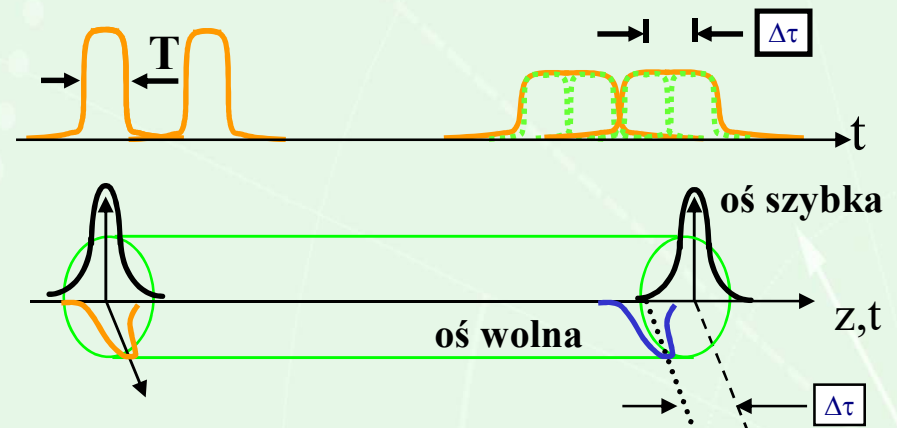
Opóźnienie to jest nazywane: **różnicowe opóźnienie grupowe** (ang. Differential Group Delay - DGD).

Kiedy składowe PSP poruszają się z różną prędkością, zwykle nazywamy je: oś „szybka” i oś „wolna”.

(a) Wyróżniona oś wolna PSP



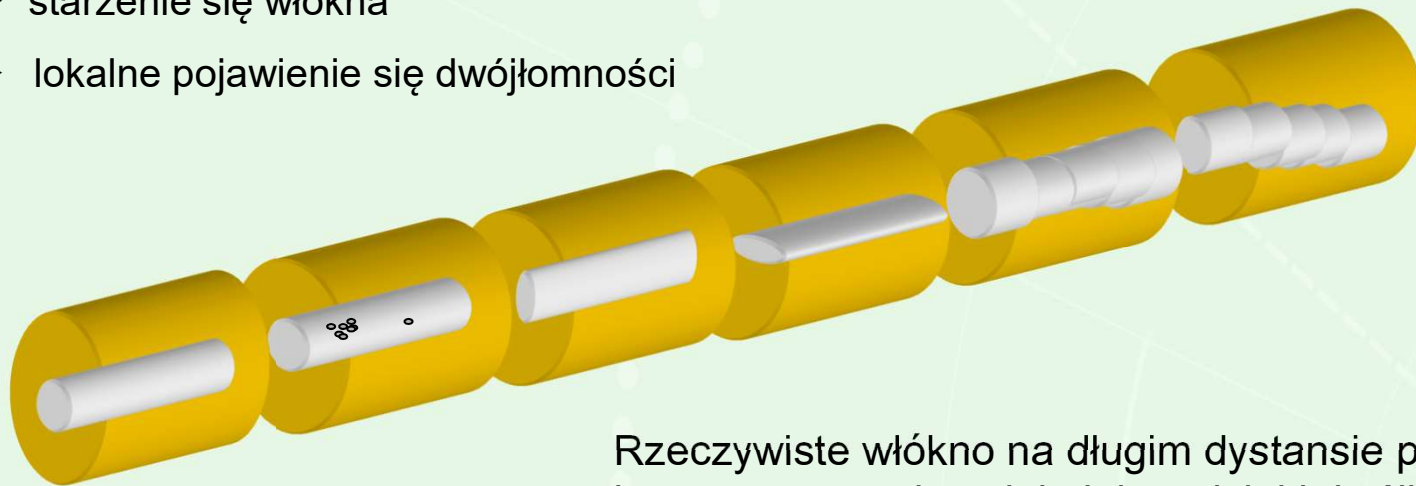
(b) Wyróżniona oś szybka PSP



## Główne powody występowania zjawiska PMD

Asymetrie we włóknie (niecentryczność płaszcz/rdzeń) powstałe podczas produkcji włókna

- naprężenia wywołane podczas produkcji kabla („opakowywanie” włókna)
- zewnętrzne naprężenia (makro/mikro zagięcia, skręcenia, wibracje, naprężenia, zmiany temperatury) powstałe podczas instalacji lub serwisowania włókna
- starzenie się włókna
- lokalne pojawienie się dwójłomności

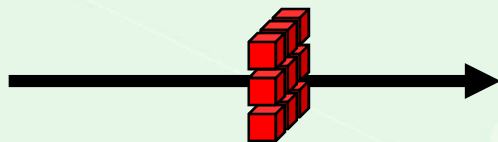


Rzeczywiste włókno na długim dystansie posiada losowo występujące lokalnie „odcinki dwójłomne”

## Polarisation Mode Dispersion - wizualizacja

---

- Wyobraźmy sobie impuls świetlny przechodzący przez włókno, (dla lepszego wyobrażenia) podzielony na 9 elementów

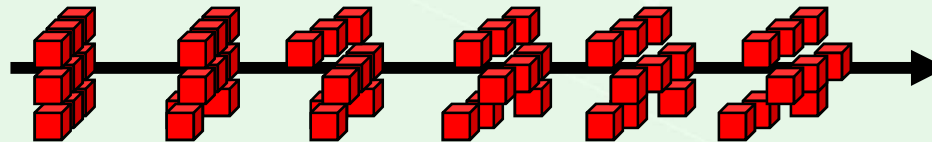


## Polarisation Mode Dispersion - wizualizacja

- Odcinki włókna:



- Impulsy światła:



||

| |

szerokość impulsu

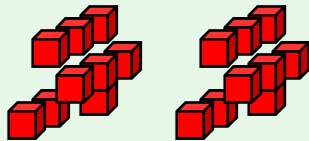
## Polarisation Mode Dispersion - wizualizacja

- Jeżeli nadajemy 1-0-1:



1 0 1

- Z wpływem PMD, otrzymujemy:



1 0 1

« 1 » traci światło, a przy « 0 » może ono się pojawić ... **Wiec wzrost BER**

## Cechy PMD

---

### Dyspersja polaryzacyjna

- występuje tylko we włóknach jednomodowych
- Jest stochastyczna
- Jest nieliniowa
- Jest zmienna (np. pod wpływem naprężeń we włóknie)
- Nie może być kompensowana (możemy tylko kontrolować)

## Cechy PMD

---

- ❑ PMD mierzona jest w *[ps]*

Ponieważ każda nowa skaza we włóknie może częściowo zrównoważyć wpływ wcześniejszej wady lecz całkowity rezultat jest stopniowym wzrostem PMD. Właściwą jednostką dla współczynnika, który charakteryzuje włókno jest:

- ❑ Współczynnik dyspersji polaryzacyjnej

$$D = \frac{\text{ps}}{\sqrt{\text{km}}}$$

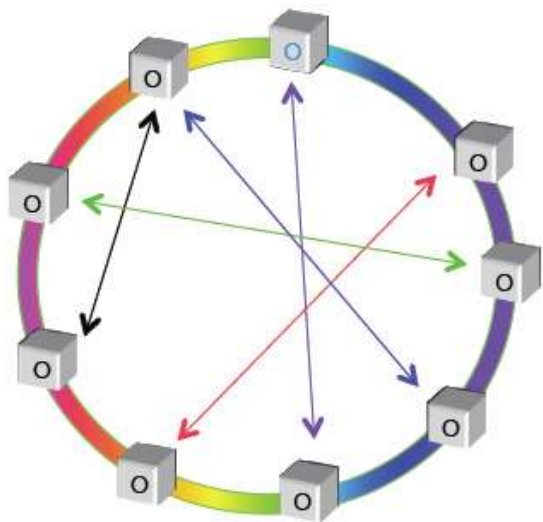


POZNAŃ SUPERCOMPUTING AND NETWORKING CENTER

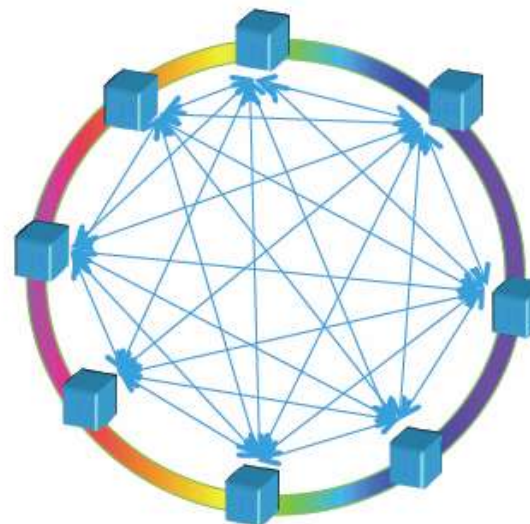
## **Sieci optyczne nowej generacji**

## Sieci optyczne

Mniejszy Opex – prostsza architektura sieci, łatwiejsze planowanie sieci



Zwiększenie  
Efektywności  
Opex



### Architektura oparta o OADM

Prze-planowanie sieci w momencie dodawania nowej usługi

Tylko niektóre węzły komunikują się ze sobą

Duża liczba interwencji dokonywanych przez serwisantów



### Architektura oparta o ROADM

Jednorazowe planowanie sieci

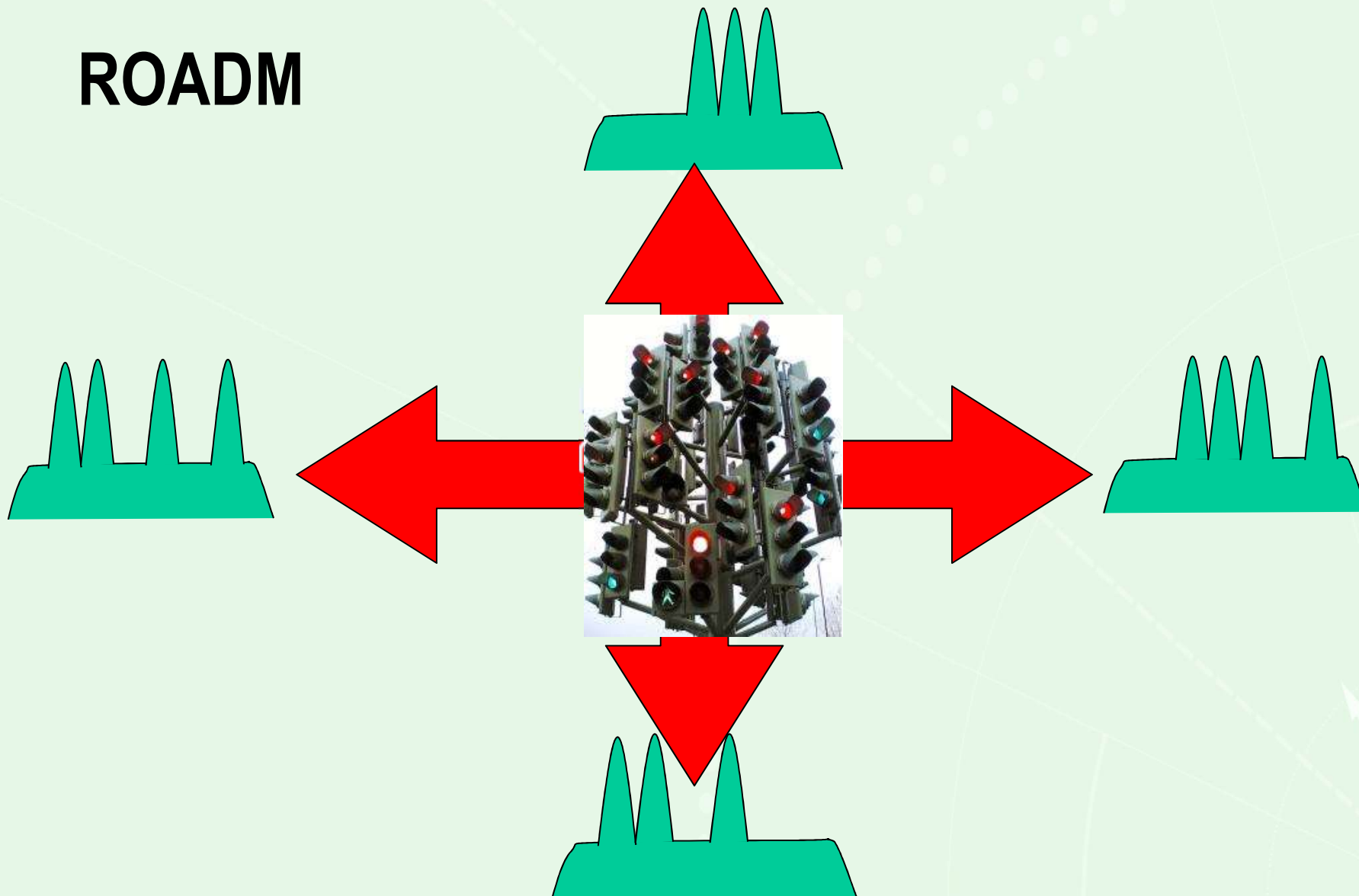
Wszystkie węzły mogą "rozmawiać" ze sobą od momentu uruchomienia sieci

Automatyczne strojenie sieci

Zwiększona jakość sieci poprzez DGE (Digital Gain Equal.) w każdym węzle



# ROADM



## Co to jest ROADM ?

### ROADM – Reconfigurable Optical ADD & Drop Multiplexer

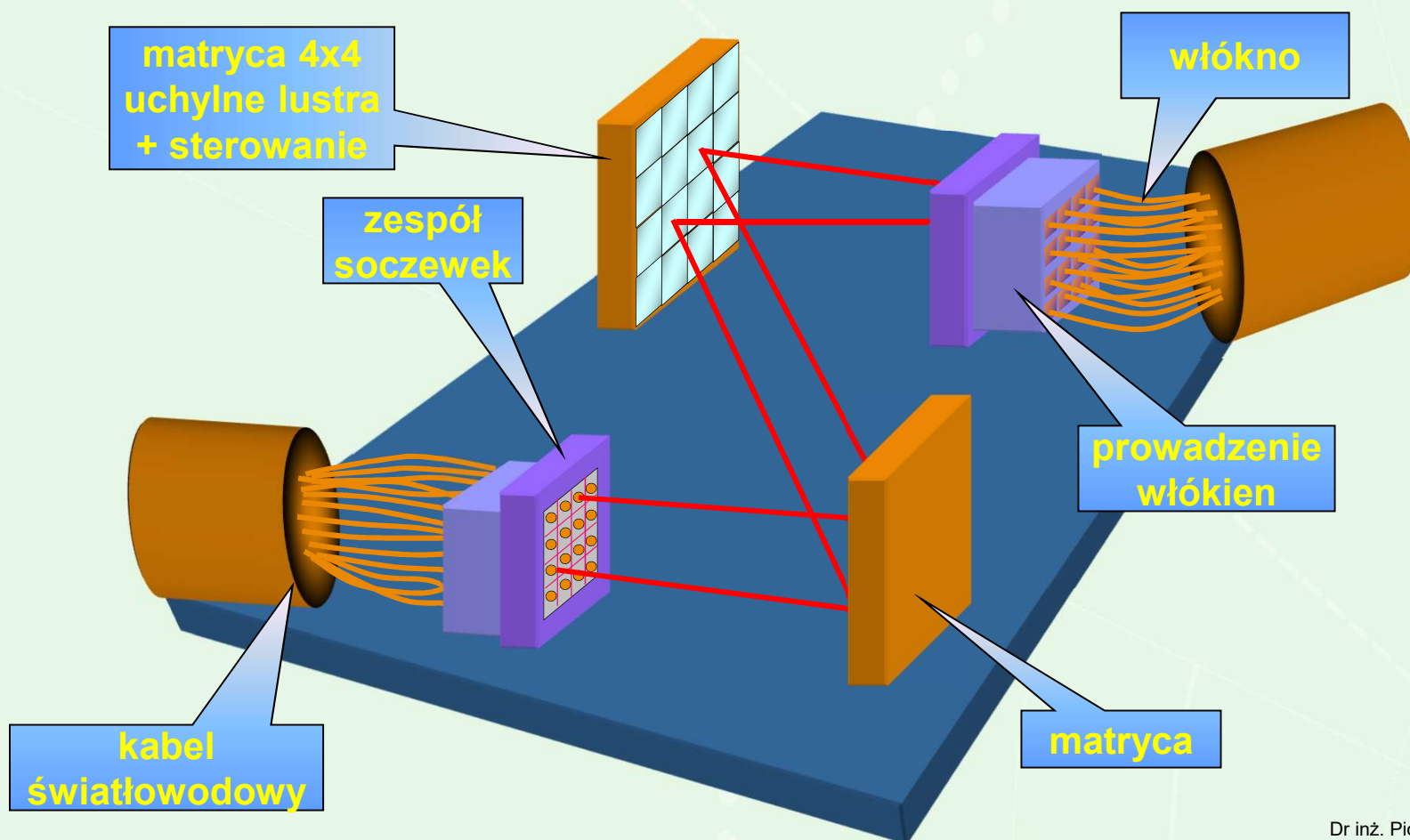
- Ogólnie ROADM jest elementem optycznie transparentnym. Oznacza to, że ROADM jest „przezroczysty” dla szybkości przesyłanych danych, ramkowania lub formatu modulacji sygnału optycznego
- ROADM jest elementem w sieci optycznej, który jest zdolny przenieść dowolny kanał/długość fali pomiędzy liniowym interfejsem węzła DWDM i dodać/usunąć jakikolwiek oddzielny kanał/długość fali z liniowego interfejsu DWDM na port typu add/drop
- Zmiana ustawień pracy elementu ROADM jest programowalna dlatego możliwa jest zdalna rekonfiguracja poprzez system zarządzania

## Architektura ROADM

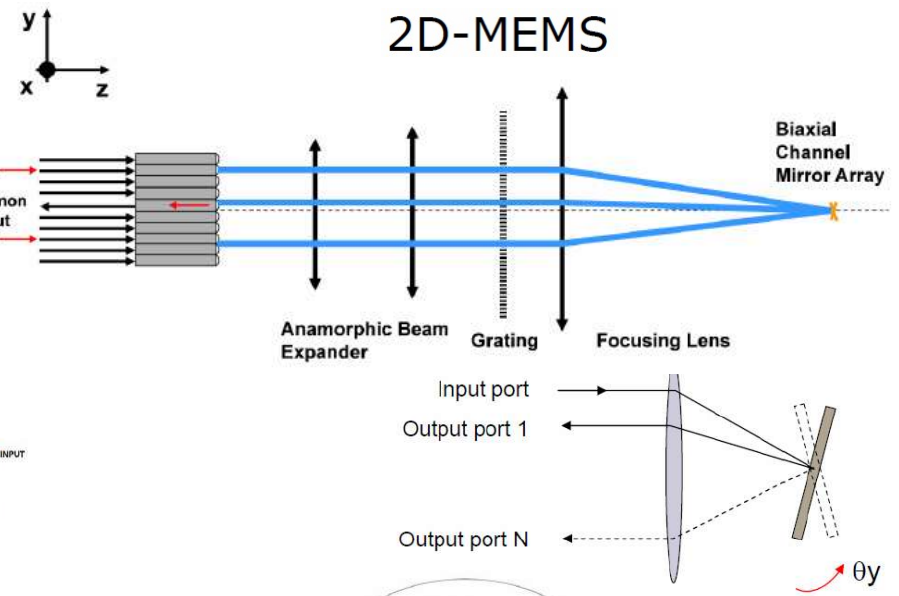
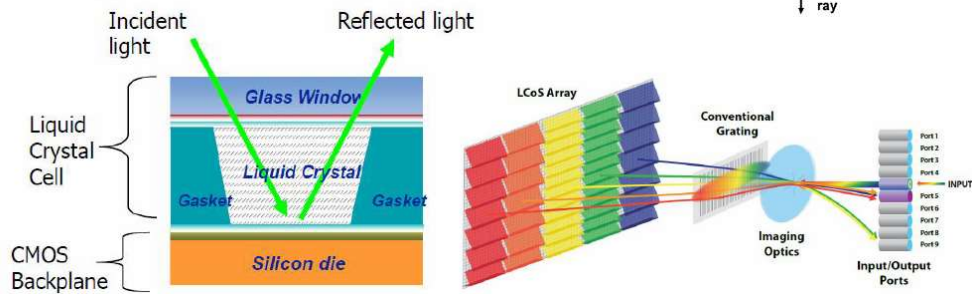
W systemach optycznych z elementami ROADM elastyczność sieci typu „mesh” może być powiększona w każdym węźle przez funkcjonalność:

- ❑ **Colorless** – możliwość zmiany długości fali transpondera aby umożliwić dostęp do każdego portu DWDM dla każdej długości fali (kanału optycznego)
- ❑ **Directionless** – możliwość dostrojenia transpondera aby mieć dostęp do każdego portu sieci DWDM
- ❑ **Contentionless** – dostęp nieblokowany do każdego portu sieci DWDM

## Przełącznik mechano-optyczny 3D MEMS – Micro ElectroMechanical System



## Liquid Crystal on Silicon (LCoS)



### Przełącznik mechano-optyczny 2D MEMS (Micro-ElectroMechanical Systems)

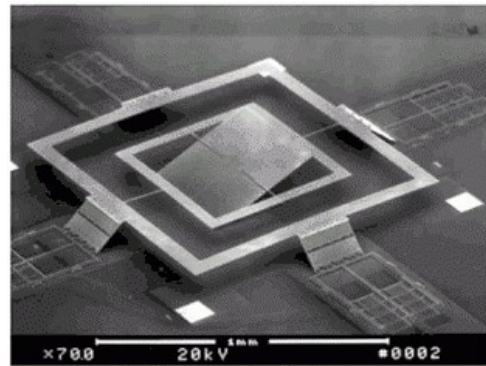
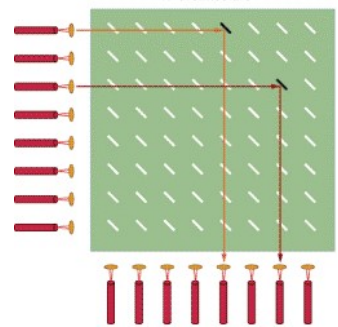
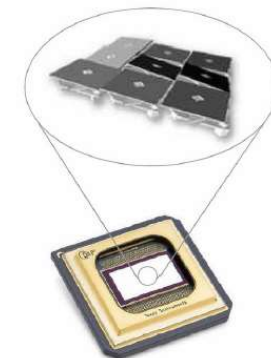


Figure 6. 3-D 256x256 optical-crossconnect building-block MEMS mirror array.



**DLP**  
A TEXAS INSTRUMENTS TECHNOLOGY

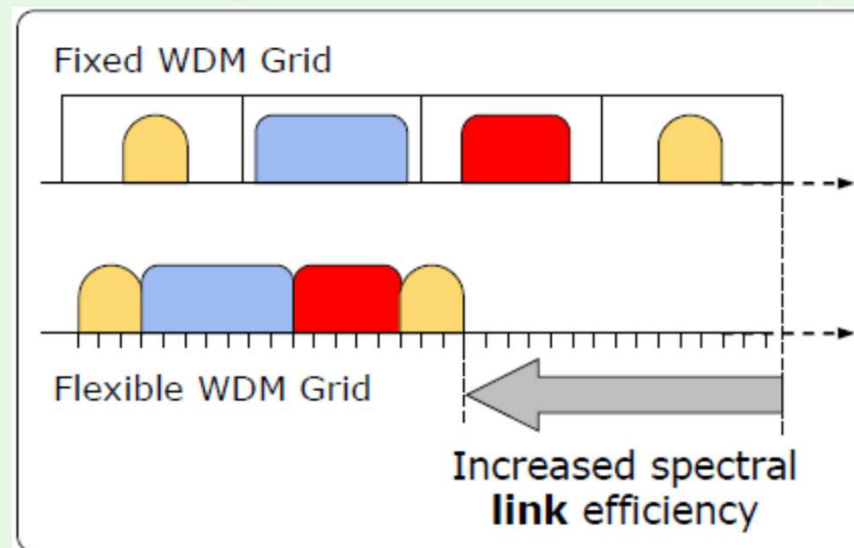
**Przełączanie optyczne pozwala na realizację procesu rekonfiguracji sieci na poziomie całkowicie optycznym (pure optical network).**

## Elastyczna siatka WDM – gridless, flexgrid

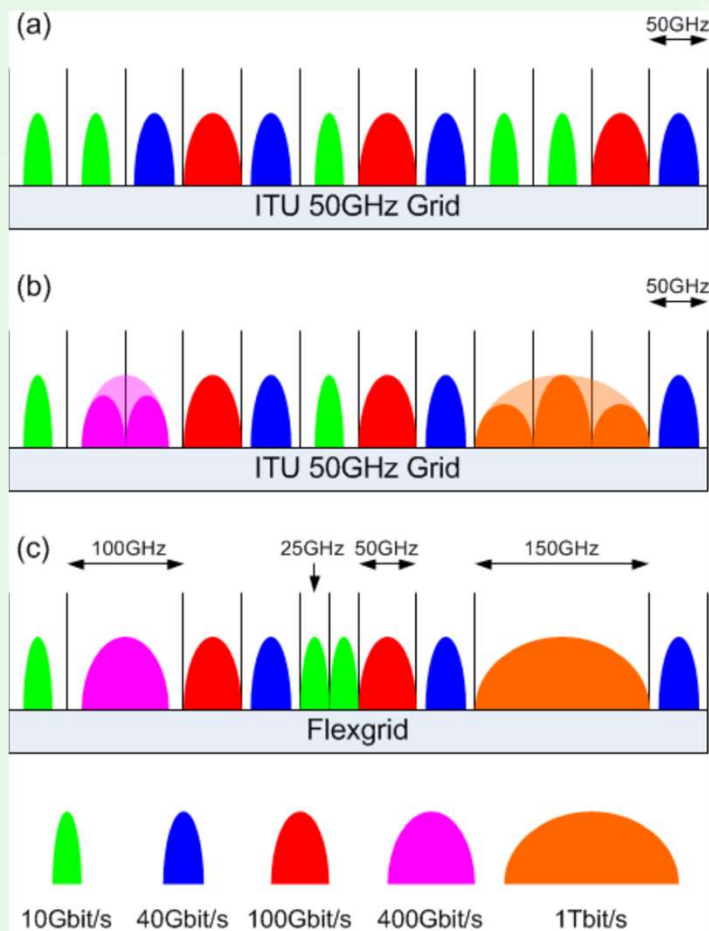
Siatka kanałów w systemie DWDM typu „flex” wymagana jest przy szybkościach  $> 100$  Gb/s

Tworzenie elastycznych systemów DWDM - 10G/40G/100G oraz usługi „obcej lambdy” (alien wavelength) oraz „super-kanałów”

- Zmienne kanały
- 12,5 GHz krok przydziału slotu



## Funkcjonalność ROADM



Stała siatka kanałów 50GHz i Flexgrid:

(a) „mieszanina” sygnałów (ze 100Gbit/s włącznie) pracujących na siatce 50GHz.

Kiedy szybkość się zwiększa rys. (b), sygnały dużych prędkości 400Gbit/s and 1Tbit/s zajmują kilka slotów i sygnały takie nie „przejdą” przez stałe filtry.

Technologia „Flexgrid” pozwala na „mieszanie” wymagań na różne szerokości kanałów dla różnych sygnałów - jak pokazano na rys (c).

## Sieci 100G

Szybkość	Metody modulacji
Do 10Gbit/s	amplitudy
40Gbit/s	fazy lub amplitudy
100Gbit/s i więcej	fazy lub fazy i amplitudy

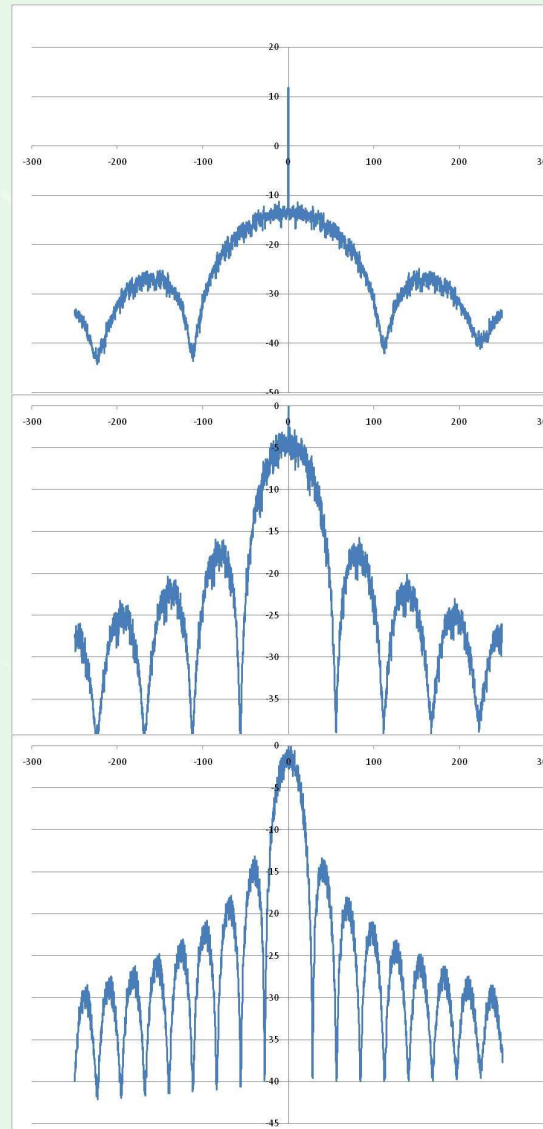
Dlaczego wykorzystuje się modulację fazy?

- Umożliwia wyższe przepływności
- Zwiększa efektywność spektralną
- Lepsza odporność na warunki CD i PMD

## 100G – efektywność spektralna

Osiągnięcie transmisji 112 Gbit/s używając standardowego schematu modulacji po prostu nie jest możliwe. Szerokość widma przekracza 50 GHz

- Nawet modulacja QPSK, o dwukrotnej efektywności spektralnej, nadal nie jest wystarczająca
- Użycie modulacji z polaryzacją w połączeniu z QPSK pozwoliłoby na transmisję 112 Gbit/s w kanałach z ROADMs 50 GHz



112 Gbit/s NRZ-OOK

112 Gbit/s NRZ-QPSK

112 Gbit/s NRZ-DP-QPSK

## Czy dodać 100G do istniejącej sieci czy budować nową sieć koherentną ?

Dwie opcje:

- Dodać kanały 100G do istniejącej sieci i stworzyć hybrydę 10G/100G
- Zbudować nową sieć z sygnałami koherentnymi (dedykowane włókna)

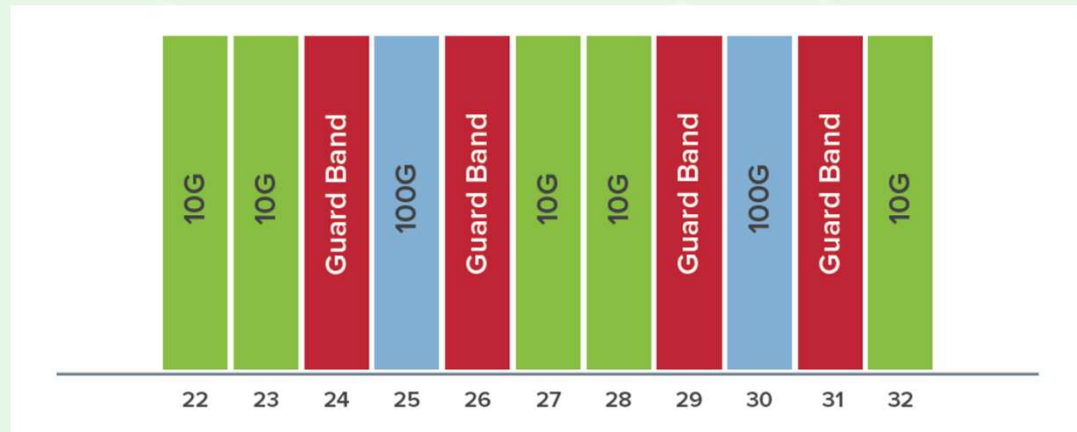
Czynniki do rozważenia obejmują:

- Obecne wykorzystanie kanałów w sieci
- Przewidzenie rozwoju ruchu w sieci
- Wiek istniejącego sprzętu transmisyjnego
- Wymagany zasięg oraz czy większy zasięg systemu koherentnego byłby korzystny i zyskowny
- Wpływ zjawisk nieliniowych

Wszystkie te czynniki należy rozważyć łącznie z budżetem kosztów inwestycji i utrzymania.

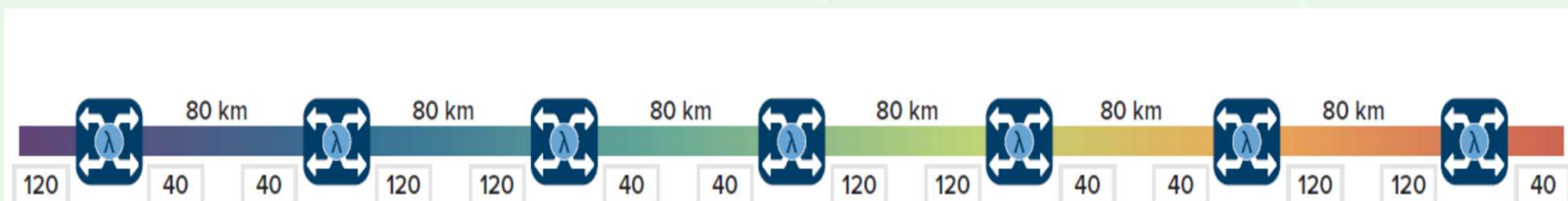
## Czy dodać 100G do istniejącej sieci czy budować nową sieć koherentną?

### Pasma ochronne (Guard Band)



## Wpływ 10G i kompensacji dyspersji na osiągi 100G

Dodatkową techniką, która może być stosowana do poprawy wydajności 100 G w mieszanych sieciach 10G/100G, jest dostosowanie **planu kompensacji CD** w celu jej zwiększenia dla systemu koherentnego 100G w aby zmniejszyć efekty nieliniowe, przy jednoczesnym zachowaniu resztkowej dyspersji chromatycznej mieszczącej się w tolerancji odbiorników 10G.

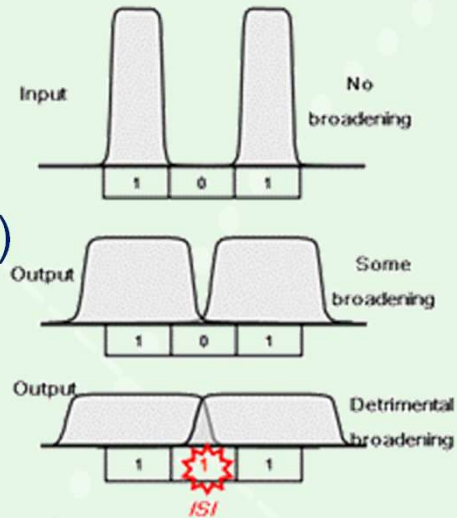


## Trudności przy wprowadzaniu systemów 100G

- ❑ Zostały osiągnięte ograniczenia fizyczne
  - ❑ Limity we włóknie optycznym (np. czystość szkła => tłumienie)
  - ❑ Limit mocy optycznej we włóknie (zjawiska nieliniowe)
  - ❑ Limity optyki nadajników (stabilizacja temperaturowa)
- ❑ Tradycyjne technologie (kodowanie NRZ, wzmacniacze optyczne EDFA, optyczne krotnice OADM itp.) mają problem przy 100G

## Impairment

▪ PMD/CD pulse spreading → Bits that overlap (ISI)



▪ Interchannel crosstalk → Extra noise from neighbour channel

▪ Cross-phase modulation → Extra noise due to NLE

▪ Carrier leakage → Extra noise from transmitter

**Worse BER!**

## Nowe problemy: nowe źródło szumów

- Dawniej (1G - 10G)

$$Noise = N_{ASE}$$

Correlation between  
OSNR & BER

- Dzisiaj (100G i więcej)

$$Noise = N_{ASE} + N_{NLE} + N_{x-talk} + N_{CL}$$

ASE: amplified spontaneous emission (noise from amplifiers)

NLE: nonlinear effects like cross-phase modulation, FWM

X-talk: cross-talk

CL: carrier leakage

Less correlation between  
OSNR & BER

## Jakie są warunki na wykorzystanie systemów 100G?

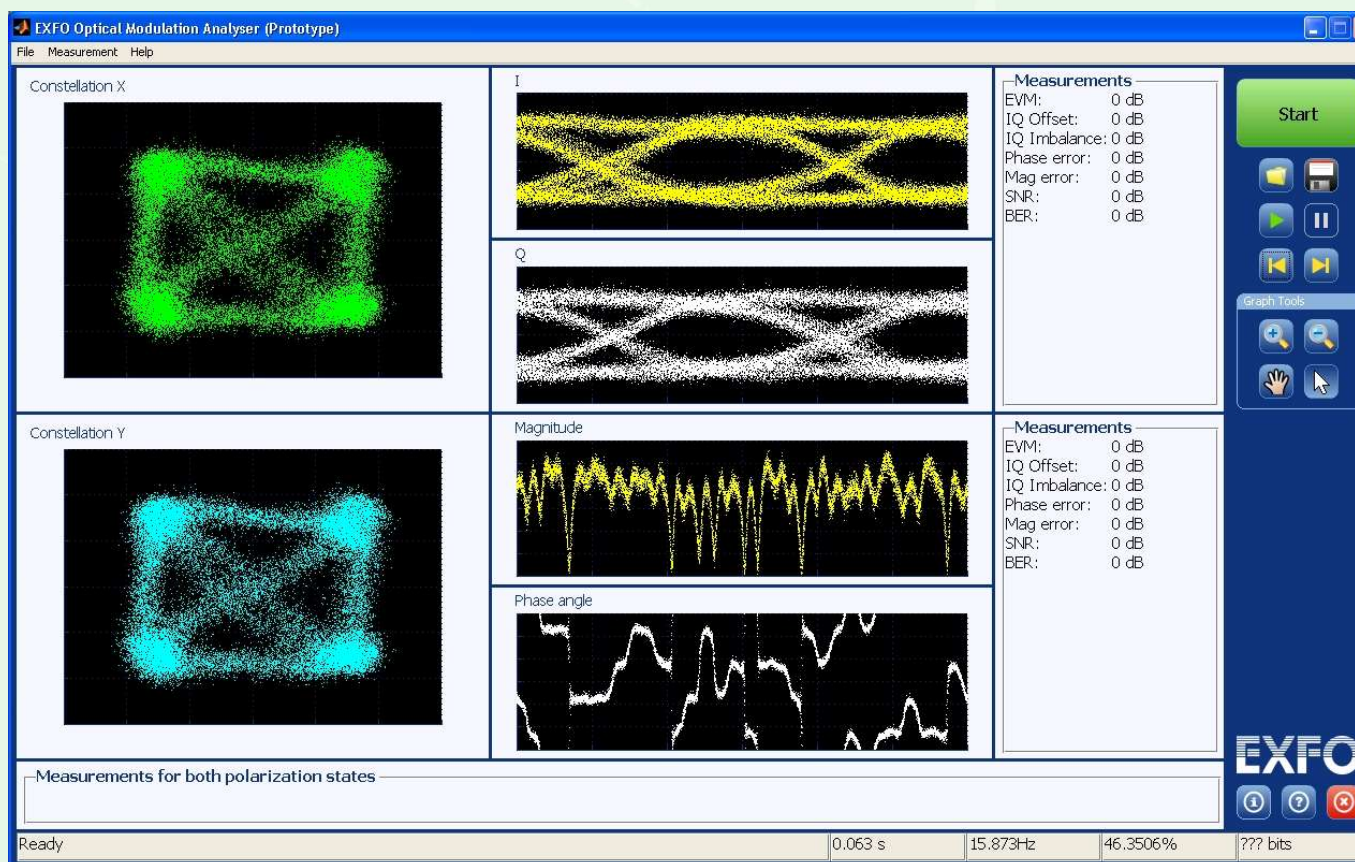
Warunki aby możliwe było wykorzystanie systemu transmisyjnego 100G:

- ❑ Większa tolerancja CD i PMD
- ❑ Dopasowanie do siatki WDM – 50GHz lub 12,5GHz
  - Współpraca z istniejącymi kanałami 10G/40G
- ❑ Kompatybilność ze wzmacniaczami EDFAs i węzłami ROADMs
- ❑ Wysoki OSNR
  - Wysoka czułość odbiornika
  - Niski szum wzmacniaczy EDFA

### Rozwiązanie:

**Nowe systemy transmisyjne z detekcją koherentną z nowymi formatami modulacji**

## Analizator modulacji – testy DP-QPSK



## Transmisja koherentna

- ❑ Systemy koherentne są znacznie czulsze niż systemy tradycyjne (10G OOK)
- ❑ Dodatkową poprawę czułości można uzyskać stosując inne rodzaje modulacji sygnału (np. fazy) co w systemach z detekcją bezpośrednią nie było możliwe.
- ❑ Łatwa korekcja charakterystyki dyspersyjnej światłowodu na drodze elektrycznej (układy DSP)
  
- ❑ Aby fala świetlna niosąca sygnał użyteczny i fala pochodząca z lokalnego lasera odbiorczego mogły ze sobą interferować (detekcja koherentna) obie fale muszą mieć jednakową polaryzację
- ❑ Wadą systemów koherentnych jest konieczność spełnienia ostrych wymagań dotyczących szerokości linii widmowych laserów przez nadajniki i odbiorniki, ich wzajemnej stabilizacji, jednakowej polaryzacji sygnałów.

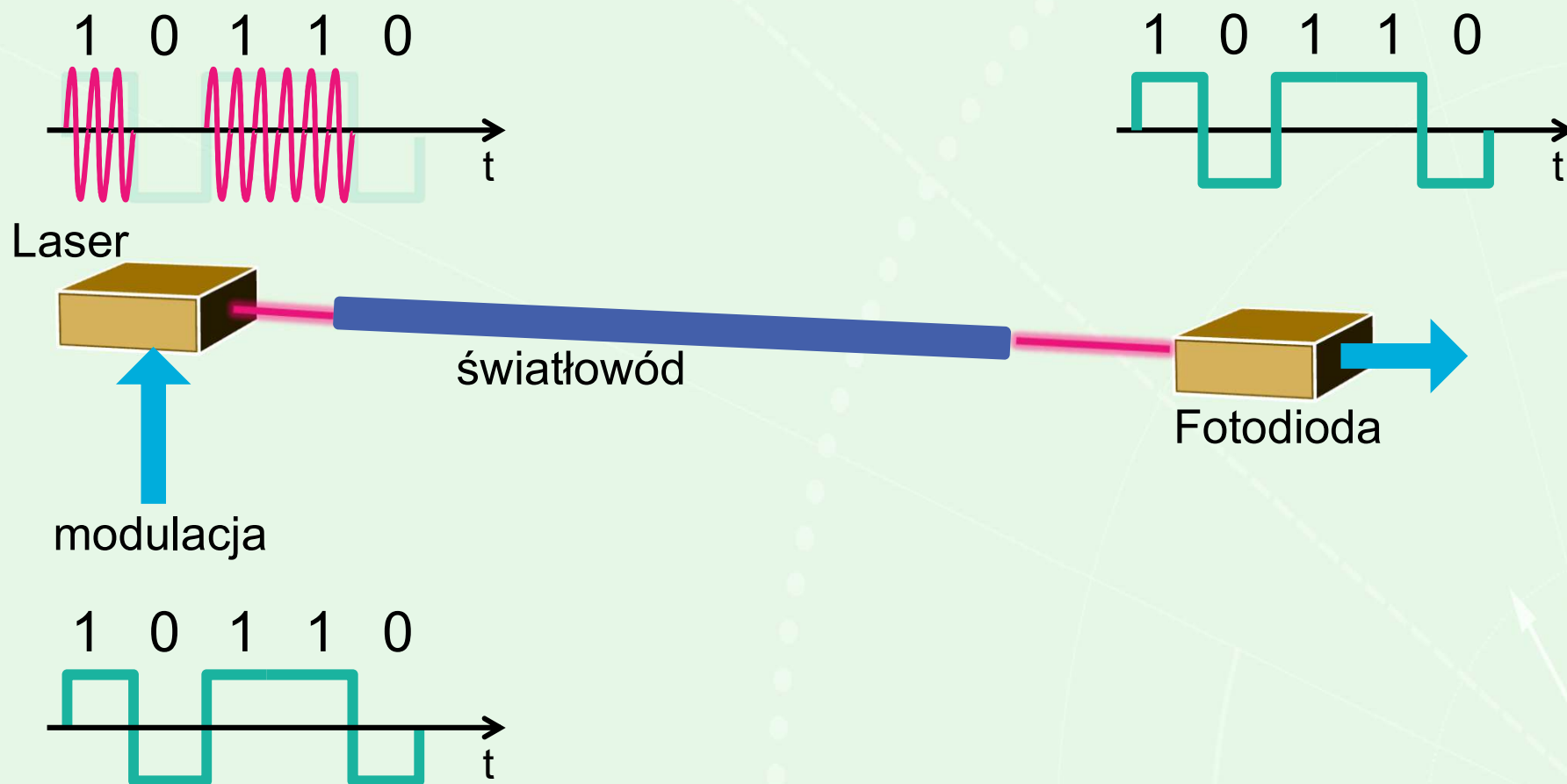
## Odbiór koherentny

- W odróżnieniu do detekcji bezpośredniej technologia koherentna uwzględnia **wszystkie aspekty falowe światła**.
  
- Proces detekcji koherentnej jest czuły na
  - **amplitudę,**
  - **częstotliwość**
  - **fazę**optycznego sygnału wejściowego.

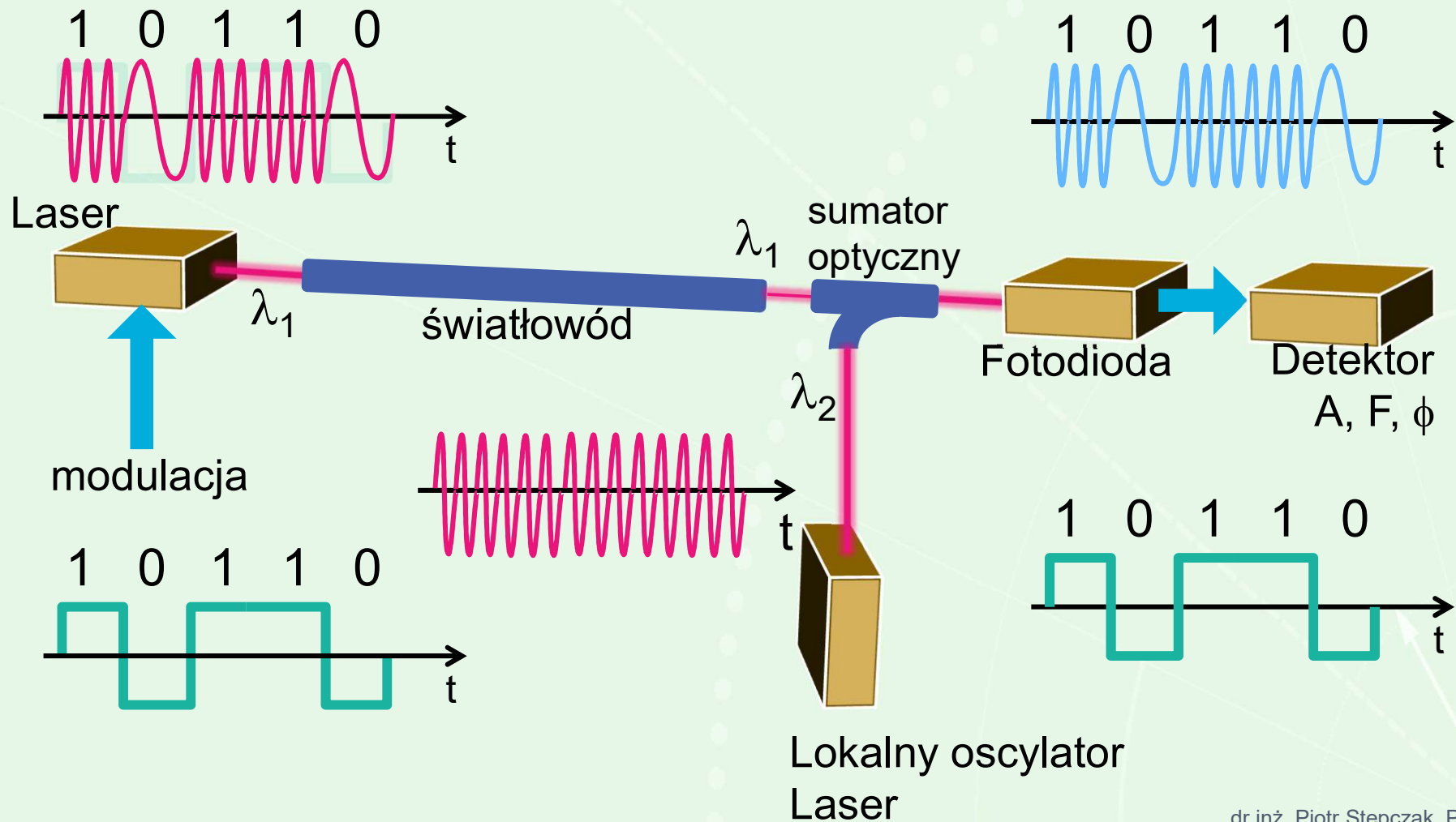
## Odbiór koherentny

- Główny zalety
  - Większa czułość odbioru (o 5dB - 20dB)
  - Większa i łatwiejsza do uzyskania selektywność
  - Możliwość odbioru wszystkich rodzajów modulacji

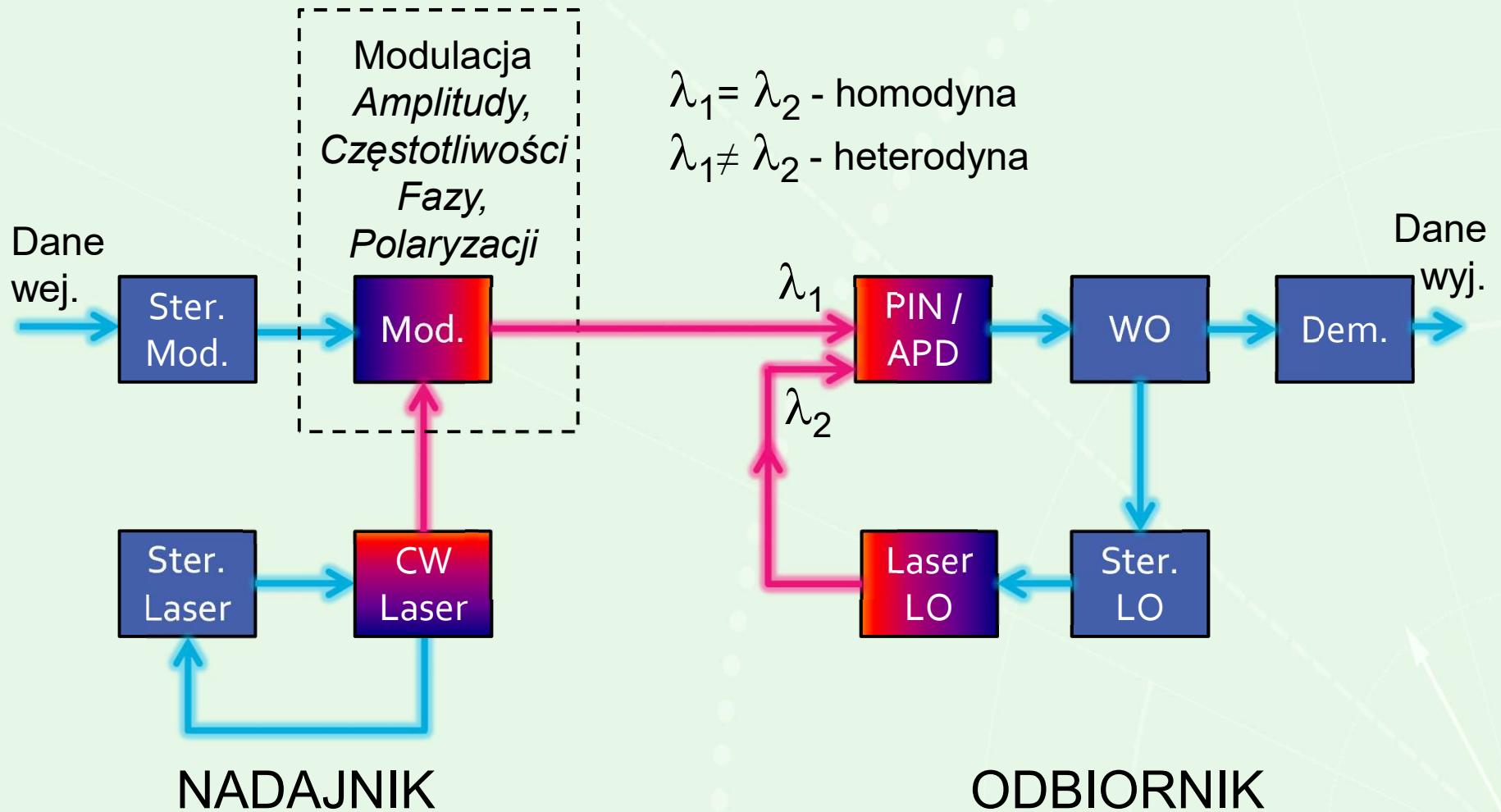
## System IM / DD



# System koherentny



# System koherentny



## Korzyści detekcji koherentnej

### Większy stosunek sygnału do szumu (SNR)

- Możliwość zwiększenia zasięgu transmisji (odcinków regeneracyjnych) przy utrzymaniu mocy optycznej źródła na tym samym poziomie
- Możliwość zwiększenia pasma transmisyjnego przy niezmiennym budżecie mocy optycznej

## Nowy format modulacji

### ❑ Zaawansowane schematy modulacji

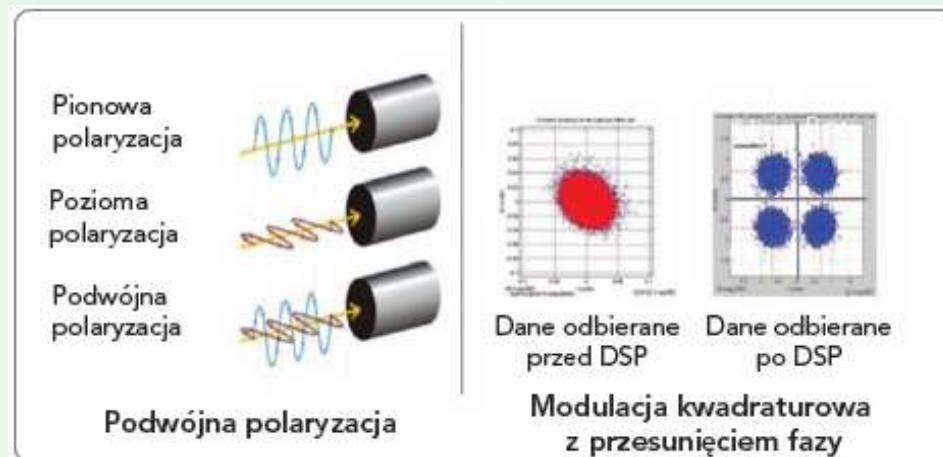
- Nowe formaty: Quadrature Phase Shift Keying, 16-QAM, 64 QAM

### ❑ Multipleksacja polaryzacyjna

- Wysyłanie 2x sygnałów o ortogonalnych stanach polaryzacji (Dual Polarization QPSK)

### ❑ Detekcja koherentna & DSP

- cyfrowe przetwarzanie (DSP) może skorygować wiele zaburzeń
- Przepływność 112Gbits/s jest osiągnięta z szybkością 28GBaud/s



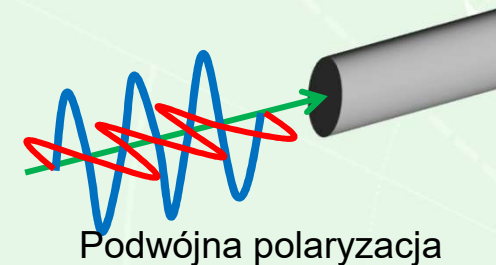
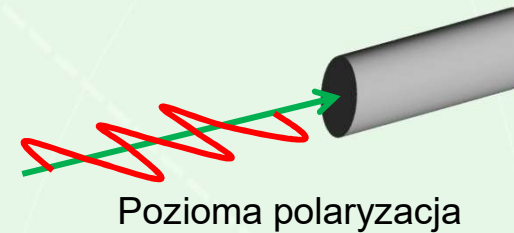
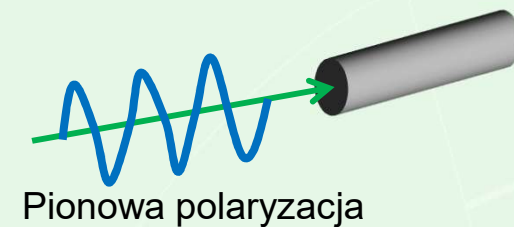
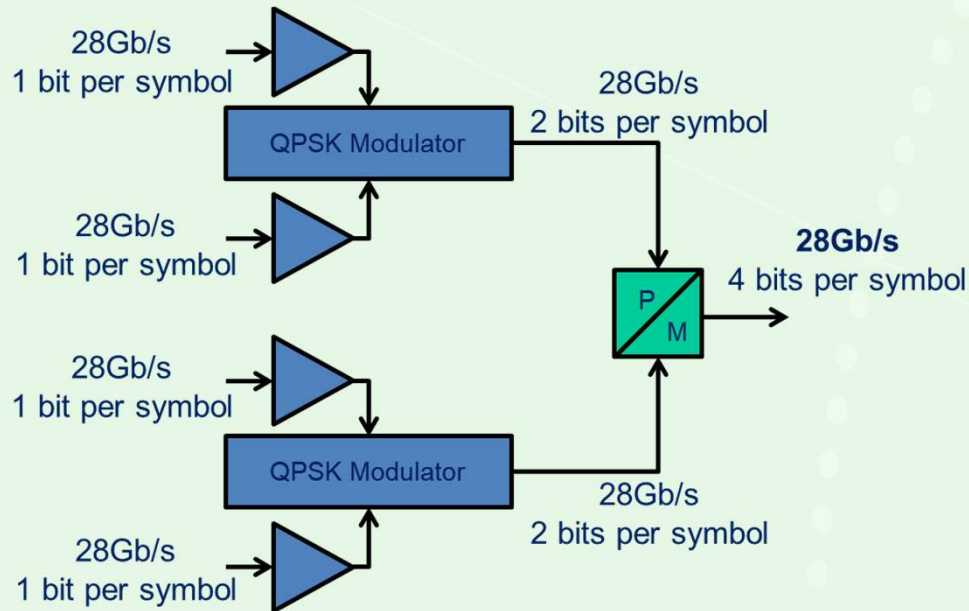
# Transmisja 100G+

<p>Im OOK Re</p>	<p>Im DPSK Re</p>	<p>Im DP-QPSK Re</p>	<p>Im DC-DP-QPSK or DP-16QAM Re</p>	
<b>10G</b>	<b>40G</b>	<b>100G</b>	<b>400G</b>	<b>1T</b>
Intensity Modulation	Phase Modulation	Phase Modulation	Phase Modulation, QAM Single / Dual Carrier	QAM O-OFDM
Direct Detection	Self-coherent Detection	<i>Digital coherent Intradyne Detection</i>		
Single Polarization	<i>Dual Polarization</i>			
Optical Dispersion Compensation	ADC, RX-DSP, 28 GBd, 40 nm	ADC, RX-DSP, 60 GBd, 28 nm	TRX-DSP	

# Sieci 100G

## Polarisation Multiplexing

- ❑ DP-QPSK powszechnie używana modulacja by uzyskać przepływność 112Gb/s
- ❑ 112Gb/s bit rate przy 28Gb/s symbol rate



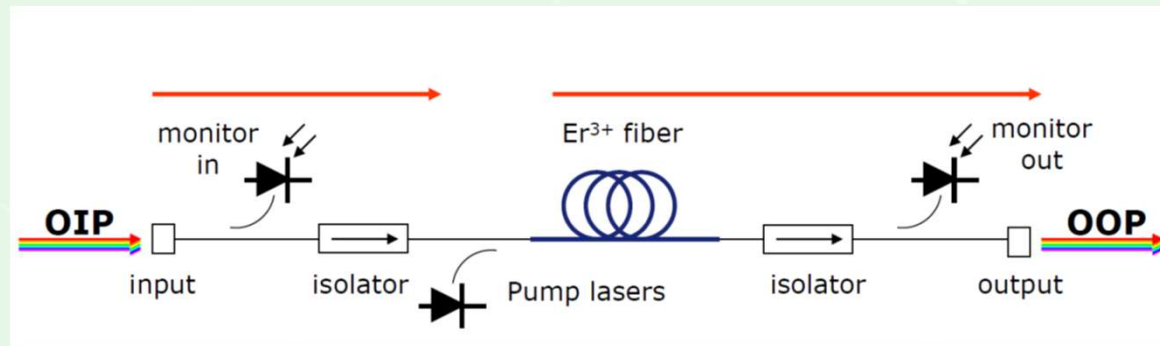
## Wzmacniacz EDFA – kilka terminów

- ❑ Optyczna moc wejściowa
  - Zależy od liczby kanałów
- ❑ Optyczna moc wyjściowa
- ❑ Wzmocnienie
  - $(P_{wy} - P_{we})$
  - Zależność częstotliwościowa wzmocnienia
- ❑ OSNR
  - Znaczenie przy kaskadzie wzmacniaczy
  - Rozwiązanie: O-E-O, FEC
- ❑ Płaskość charakterystyki wzmocnienia
- ❑ Skrośne nasycenie wzmocnienia
- ❑ Szumy
  - Szumy ASE
  - Pomiar degradacji poziomu OSNR

## Cechy wzmacniaczy

- ❑ Transparentne wzmocnienie sygnałów (niezależnie od protokołów)
  - Pozwala na zwiększenie zasięgu segmentów sieci (większy budżet mocy optycznej)
  - Więcej węzłów
  - Więcej elementów OADM
- ❑ Jednoczesne wzmocnienie wielu długości fal
- ❑ Zastąpienie drogich regeneratorów O-E-O, bezpośrednie wzmocnienie grupy kanałów

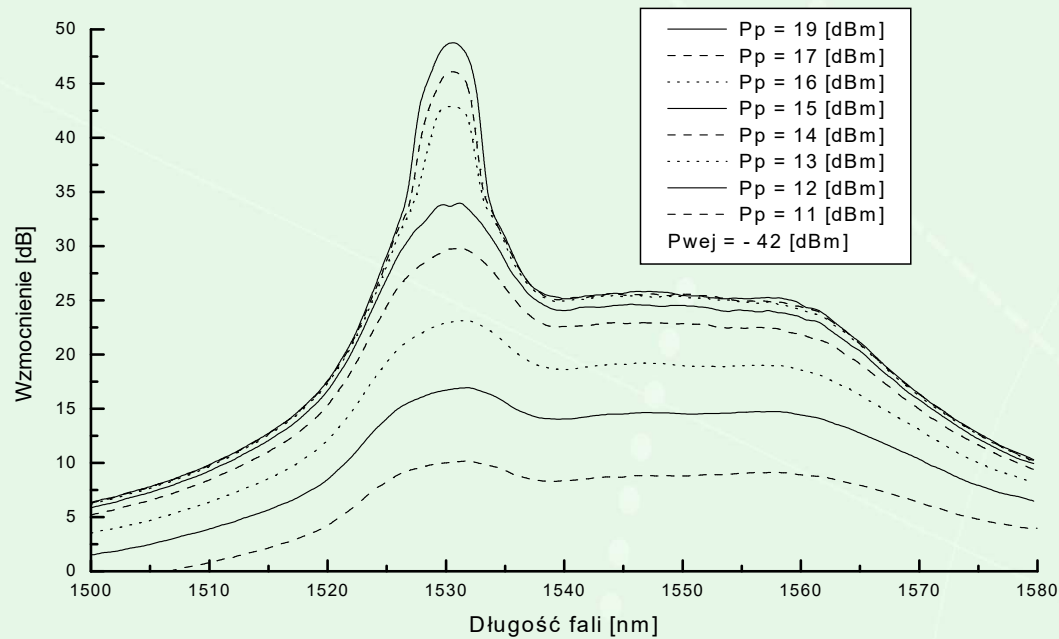
## Wzmacniacz EDFA



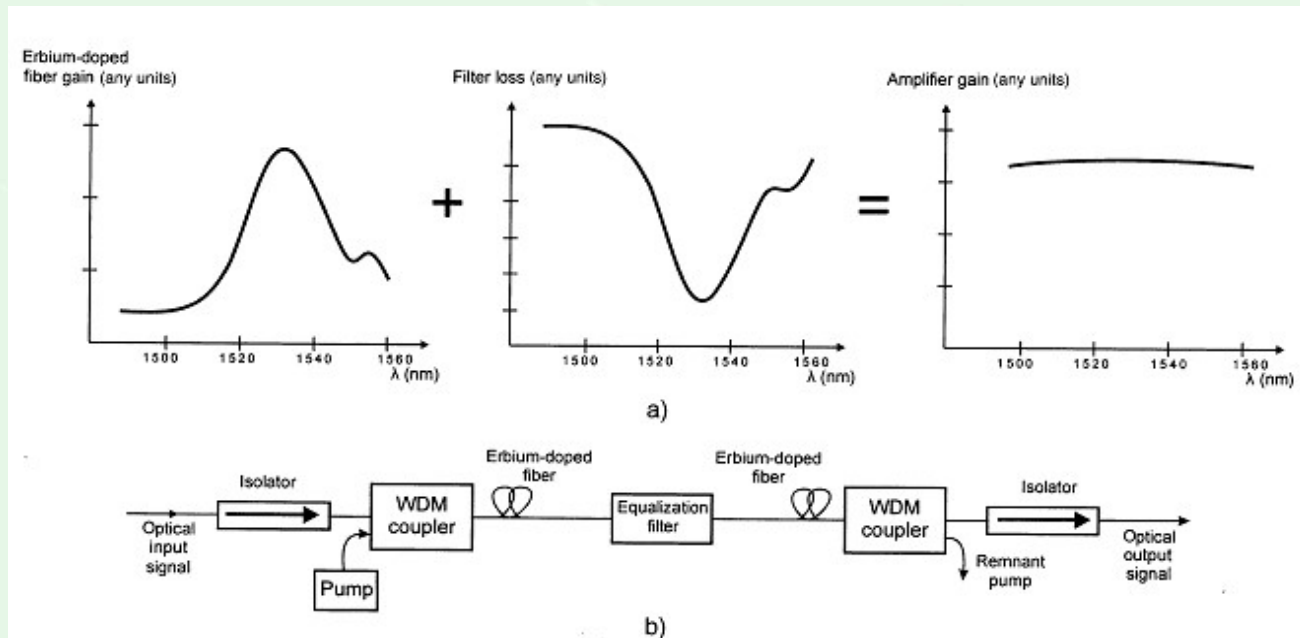
- ❑ Włókno domieszkowane jonami Erbu
- ❑ Pompa 980 nm dostarcza wzmocnienia z niskim współczynnikiem szumów
- ❑ Pompa 1480 nm dostarcza większego wzmocnienia i akceptuje szerszy zakres wzmacnianych długości fal lecz z wyższym współczynnikiem szumów
- ❑ Pompa laserowa działa zgodnie z kierunkiem transmisji
- ❑ Proces wzmocniania sygnału uzyskiwany jest w skutek zjawiska emisji wymuszonej
- ❑ Pompy są używane w obu zakresach C i L

## Płaskość charakterystyki wzmacnienia

Charakterystyka widmowa wzmacniacza EDFA dla różnych mocy pompujących

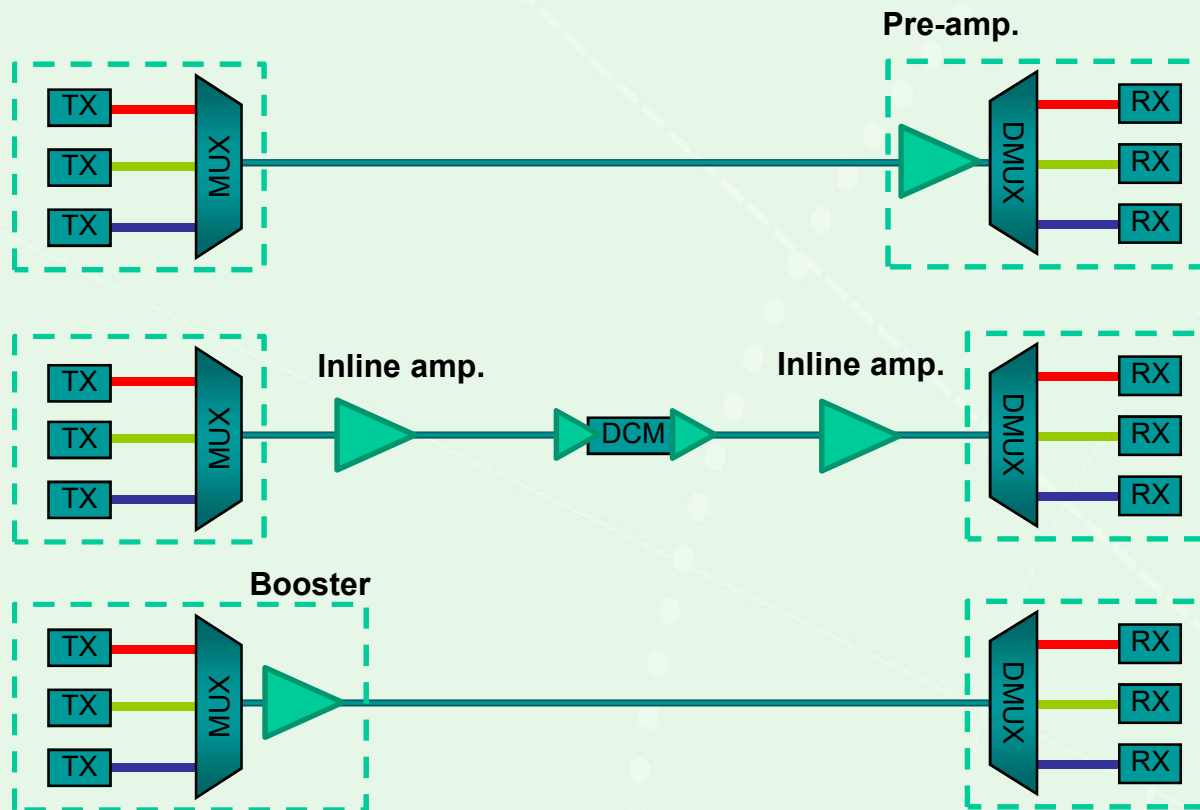


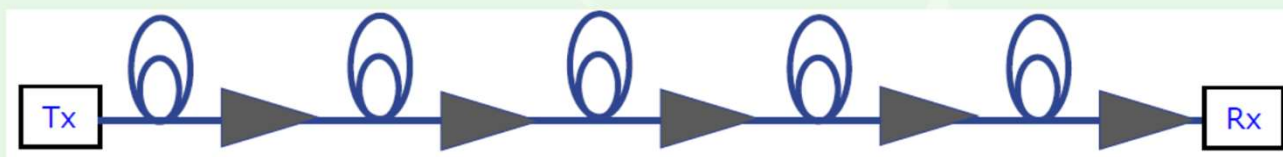
## Płaskość charakterystyki wzmocnienia



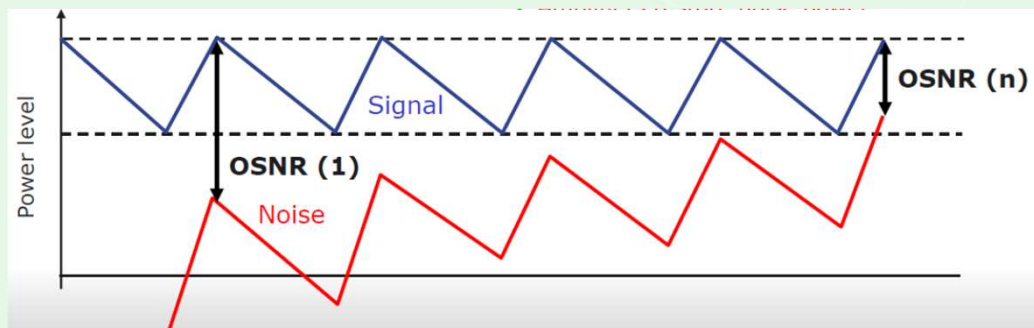
Charakterystyka widmowa wzmacniacza EDFA dla różnych mocy pompujących

## Miejsce wzmacniaczy w torze transmisyjnym





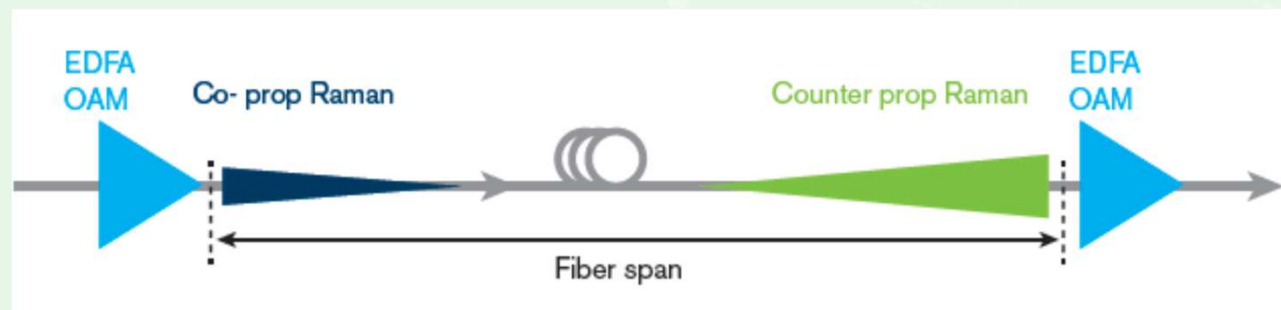
- Straty we włóknie redukują moc sygnału optycznego
- Wzmacniacze przywracają moc sygnału
- Wzmacniacze dodają szum (szum ASE)
- Włókno tłumi również poziom szumów
- Wzmacniacze przywracają moc szumu



## Wzmacniacz Ramana

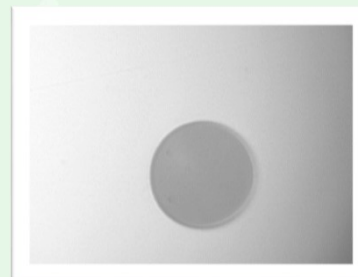
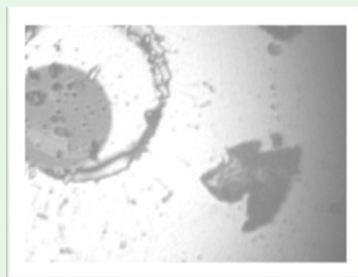
Wzmacniacz EDFA wykorzystuje specjalne włókno domieszkowane Er jako medium wzmacniające, natomiast wzmacnienie Ramana występuje we włóknie „użytkowym” – prowadzącym właściwą transmisję.

**Pompa Ramana** może być podłączona do portu Tx i bezpośrednio wzmacniać sygnał nadawany lub działać w kierunku przeciwnym podłączona do portu Rx i pompować energię w kierunku przeciwnym, dając większe wzmacnienie sygnału, kiedy staje się on coraz słabszy. Może być przez to poprawiony OSNR, który jest tak bardzo krytyczny dla koherentnych sygnałów.



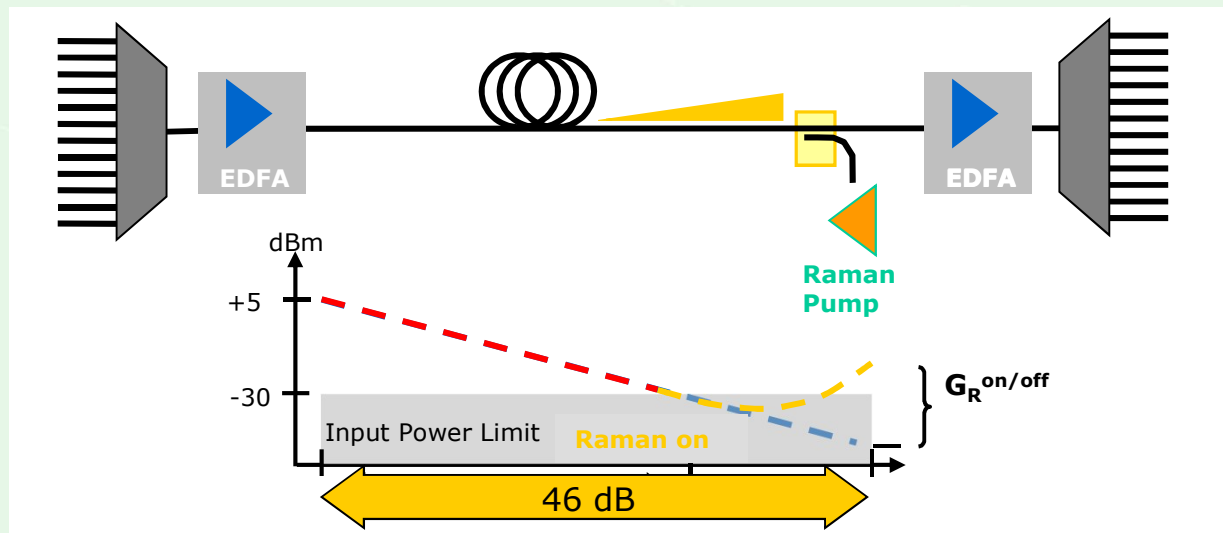
## Wzmacniacz Ramana

- ❑ Wzmocnienie Ramana wykorzystuje włókno transmisyjne jako medium wzmacniające, jakość tego włókna jest istotna. Wielkość wzmocnienia jest mocno zależna od jakości instalacji włókna.
- ❑ Podczas projektowanie trzeba uwzględnić jakość spawów, odbicia Fresnela i tłumienie włókna oraz typ włókna (SMF, LEAF, TrueWave).
- ❑ Kiepskie spawy i jakość elementów światłowodowych (również makrozagięcia na panelu) mają wpływ na możliwe osiągnięcie poziomu wzmocnienia Ramana we włóknie.
- ❑ W związku z dużym poziomem mocy pompy optycznej wzmacniacza Ramana, brudne i kiepskiej jakości złącza mają ogromne znaczenie.
- ❑ Poprawne czyszczenie czoła złącza jest bardzo ważne!



## Wzmacniacz Ramana

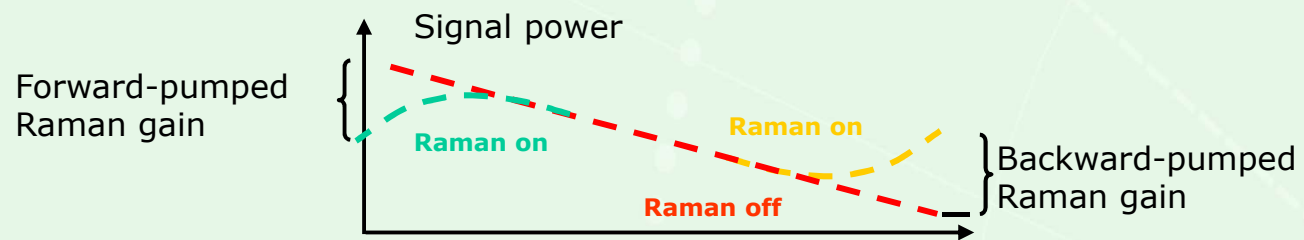
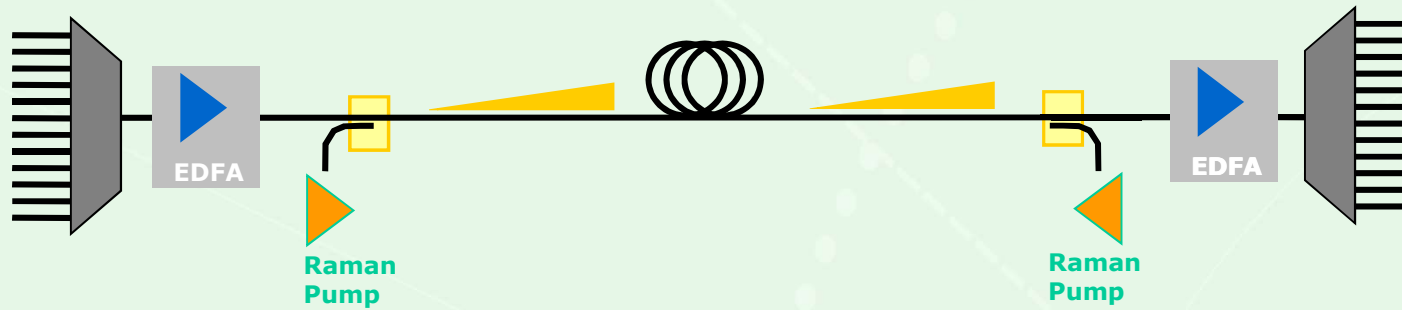
Pompa „wsteczna” - używany preamp w inline lub jako preamp dla wzmacniaczy EDFA



- Pompa na poziomie 500mW dla ~11dB wzmacnienia na włóknie SMF
- Pompowanie „wsteczne” uśrednia fluktuacje pompy widziane przez sygnał w całym czasie przejścia przez włókno
- Konieczność ochrony wzroku – wymagane automatyczne wyłączenie lasera

## Wzmacniacz Ramana

Pompa „na wejściu”



## Wzmacniacz Ramana

### Podsumowanie

- Wykorzystywane wzmocnienie w czynnym włóknie transmisyjnym
- Projektant nie ma kontroli nad włóknem ale nad pompą lasera
- Niski poziom szumów
- Wzmocnienie Ramana jest bardzo czułe na warunki toru optycznego
- Różne typy włókien generują różne wzmocnienie, różne spektrum wzmocnienia, różne warunki nieliniowe
- Mniej efektywne (mniejsze wzmocnienie do mocy pompy) i droższe w porównaniu do EDFA
- Duże tłumienie złącza (czystość) ma duży wpływ na wielkość wzmocnienia, może dojść do uszkodzenia złącza (wypalenie czoła ferruli)
- Pomiary OTDR

## ADVA FSP3000 – DWDM system

### Wavelengths per Fiber Pair

- Up to 96 wavelengths for dynamic, meshed topologies
- Up to 192 wavelengths for static point-to-point topologies

### Topology

- Point-to-point, point-to-multipoint, add/drop, ring and mesh

### Optical Protection

- Several levels of line and path protection, Fast Wavelength Restoration (FWR)

### Link Reach

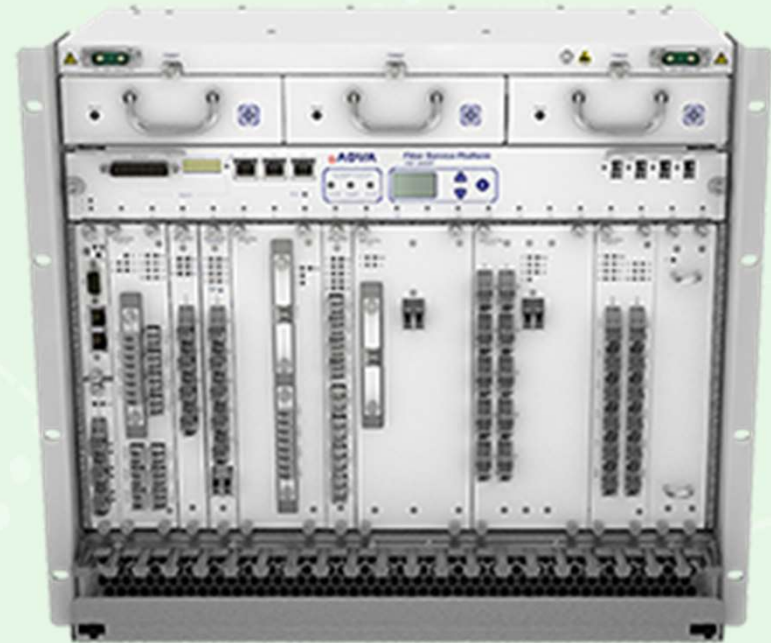
- Non-regenerated distances exceeding 3000km

### Services

- Ethernet 100Mbit/s, 1, 10, 40 and 100Gbit/s (LAN and WAN)
- Fibre Channel/FICON 1, 2, 4, 8, 10 and 16Gbit/s
- InfiniBand HP NonStop™ ServerNet Cluster
- OC-3, -12, -48, -192 and -768
- STM-1, -4, -16, -64 and -256
- OTU-1, -2, -3 and -4
- Uncompressed video
- CPRI up to 10G
- Any rate interface ranging from 125Mbit/s to 2.7Gbit/s

### Optics

- CWDM according to ITU-T G.694.2
- DWDM channel spacing 50/100GHz according to ITU-T G.694.1
- Extensive support for pluggable SFP/SFP+/XFP/CFP interfaces on both client and network ports
- Tunable interfaces on network ports
- Support for all types of client interface optics



### Management & Control Plane

- RAYcontrol™ GMPLS-based control plane for real-time optical channel provisioning, dynamic recovery and resource discovery
- OSPF-based DCN routing and constraint-based traffic routing
- SNMP and TL1 management protocol
- FSP Network Manager and FSP Service Manager
- Integration into OEM partner network management systems