

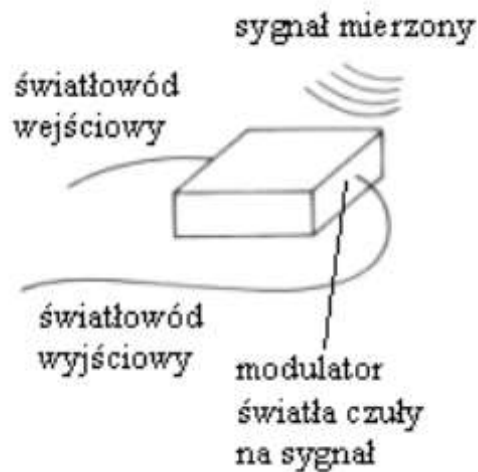
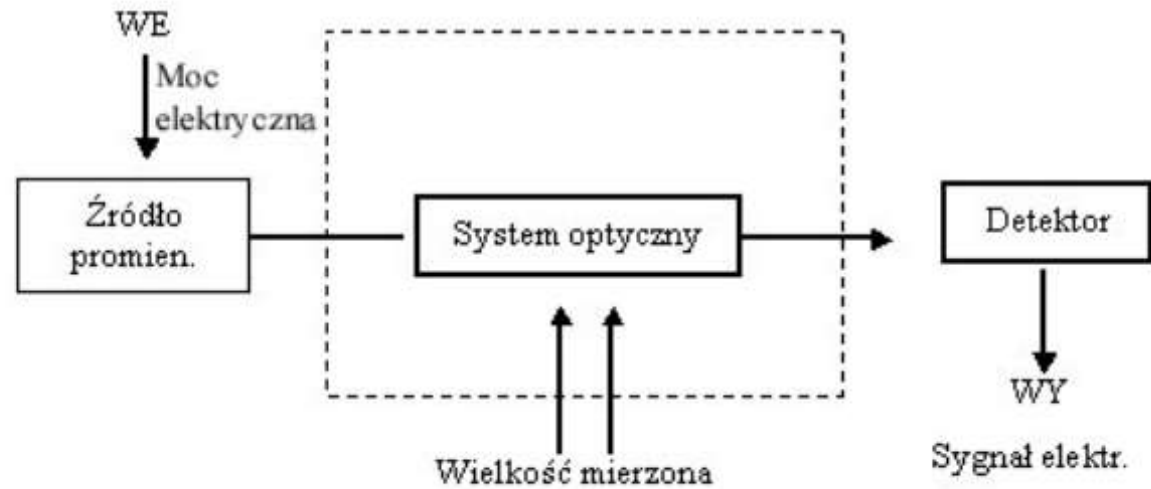
DETEKTORY I WZMACNIACZE STOSOWANE W TECHNICE ŚWIATŁOWODOWEJ

Detektory w transmisji światłowodowej

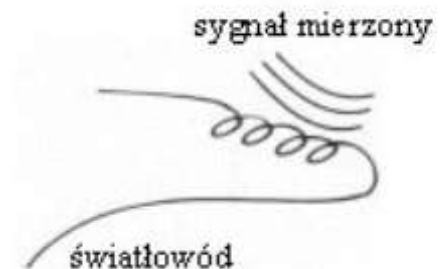
Ogólna zasada działania

Pomiar wielkości fizycznych zaburzających propagację promieniowania

Ogólny
schemat →



← czujnik zewnętrzny
i wewnętrzny →



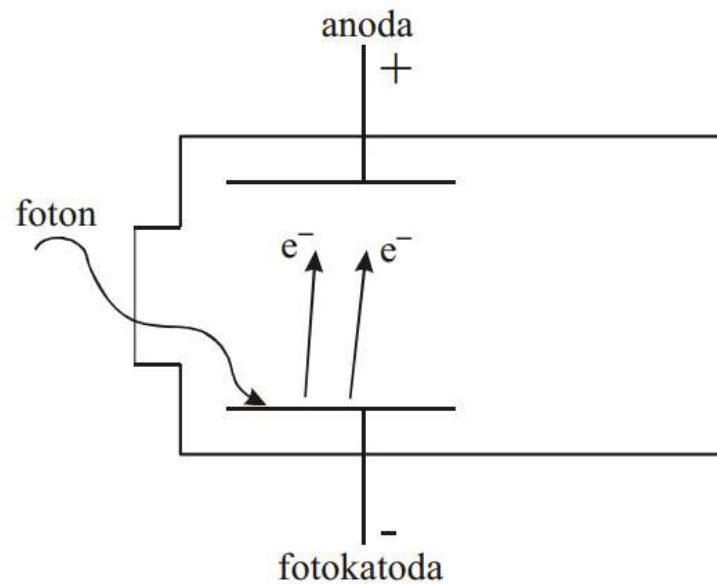
Typy detektorów i parametry charakteryzujące detektory

Rozróżniamy pięć podstawowych typów detektorów:

- a) detektory fotoemisyjne,
- b) detektory termiczne,
- c) detektory półprzewodnikowe,
- d) optyczne detektory wielokanałowe PDA (ang. photodiode arrays), zwane linijkami diodowymi,
- e) optyczne detektory wielokanałowe ze sprzężeniem ładunku (ang. charge-coupled device arrays), zwane kamerami CCD.

DETEKTORY FOTOEMISYJNE

Należą do nich fotopowielacze przeznaczone do detekcji
z zakresu UV-VIS- bliska podczerwień.



Ilustracja zasady działania fotopowielacza

DETEKTORY TERMICZNE

Należą do nich kalibrowane kalorymetry z termoparą lub termistorem, bolometry, detektory Golaya i detektory wykorzystujące zjawisko piroelektryczne. Detektory termiczne wykorzystują ciepło wytwarzane przez promieniowanie w wyniku absorpcji, dlatego ich czułość nie zależy od długości fali padającego promieniowania i mogą być stosowane w dowolnym zakresie widmowym. W przeszłości bolometry i detektory Golaya stosowane były w zakresie podczerwieni z powodu braku innych czułych detektorów w tym zakresie widmowym.

DETEKTORY PÓŁPRZEWODNIKOWE

Fotodiody fotoprzewodzące i fotowoltaiczne, używane do detekcji z zakresu UV-VIS-bliska poczerwień.

Szczegółowo o nich powiemy sobie później...

Wszystkie detektory należące do grup (a)-(c) są detektorami jednokanałowymi, czyli w określonym czasie mierzą natężenie tylko jednej wiązki światła padającej na detektor. Jeżeli więc detektor jednokanałowy umieścimy za wyjściową szczeliną monochromatora, to w danej chwili detektor może mierzyć tylko jedną składową widmową, która aktualnie pada na detektor. Dopiero gdy siatka dyfrakcyjna obróci się powodując, że na detektor padać zacznie promieniowanie o innej długości fali, detektor zarejestruje natężenie dla następnej długości fali.

Aby więc uzyskać pełne widmo, detektor musi rejestrować promieniowanie wielokrotnie dla różnych położeń siatki dyfrakcyjnej odpowiadających różnym długościom fali obracanej mechanicznie za pomocą skanującego silnika krokowego...

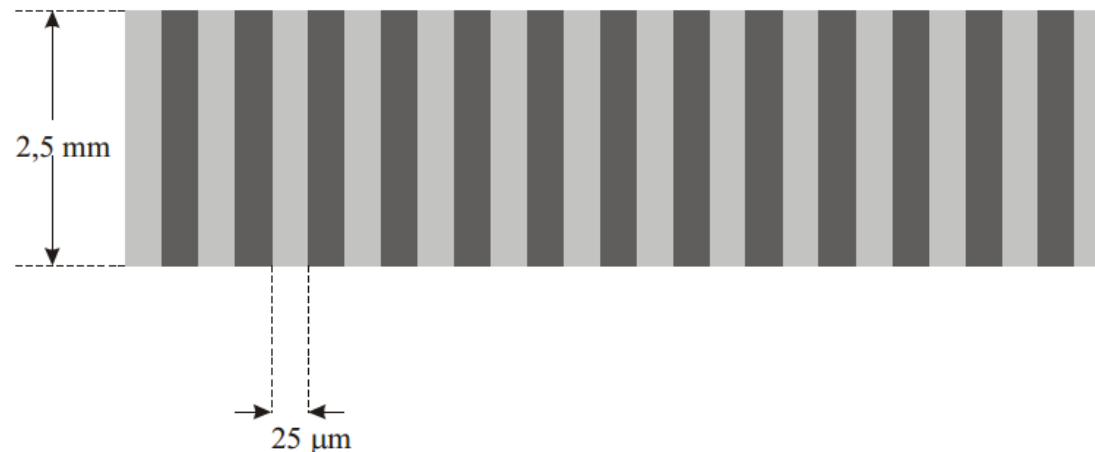
Detektory należące do grup (d)-(e) są detektorami wielokanałowymi.

LINIJKĄ DIODOWĄ

Pozwala rejestrować jednocześnie natężenie odpowiadające promieniowaniu o różnych długościach fali.

Linijka diodowa jest zbiorem detektorów krzemowych o typowych wymiarach diody $25\ \mu\text{m}$ $2,5\ \text{mm}$, umieszczonych w szeregu.

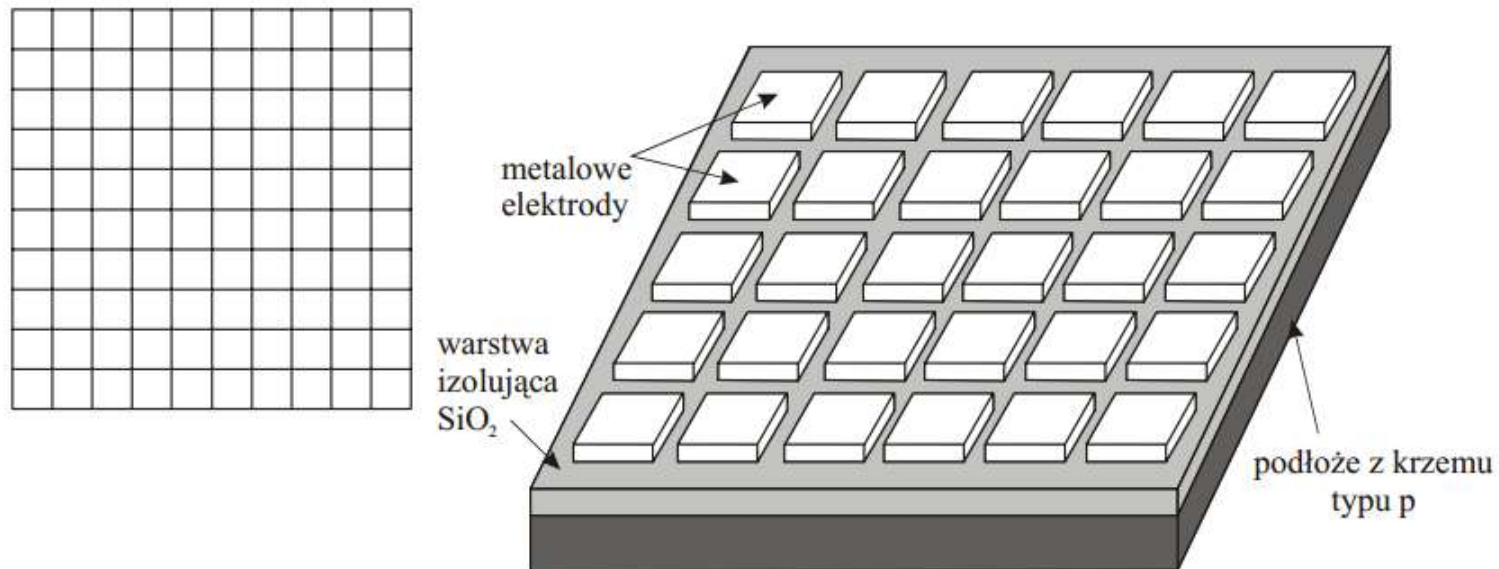
Każda dioda jest złączem p-n, do którego przyłożono napięcie w kierunku zaporowym i działa jak naładowany kondensator. Jeżeli na diodę pada światło, na złączu tworzą się pary elektron-dziura, a zewnętrzne i wewnętrzne pola elektryczne na złączu (które skierowane są zgodnie) przemieszczają dziury w kierunku obszaru p, a elektrony w kierunku n, powodując zmniejszanie ładunku na złączu, podobnie jak przy rozładowywaniu kondensatora. Sygnałem jest prąd potrzebny do „odświeżenia” diody, czyli powrót do sytuacji przed naświetleniem.



KAMERY CCD

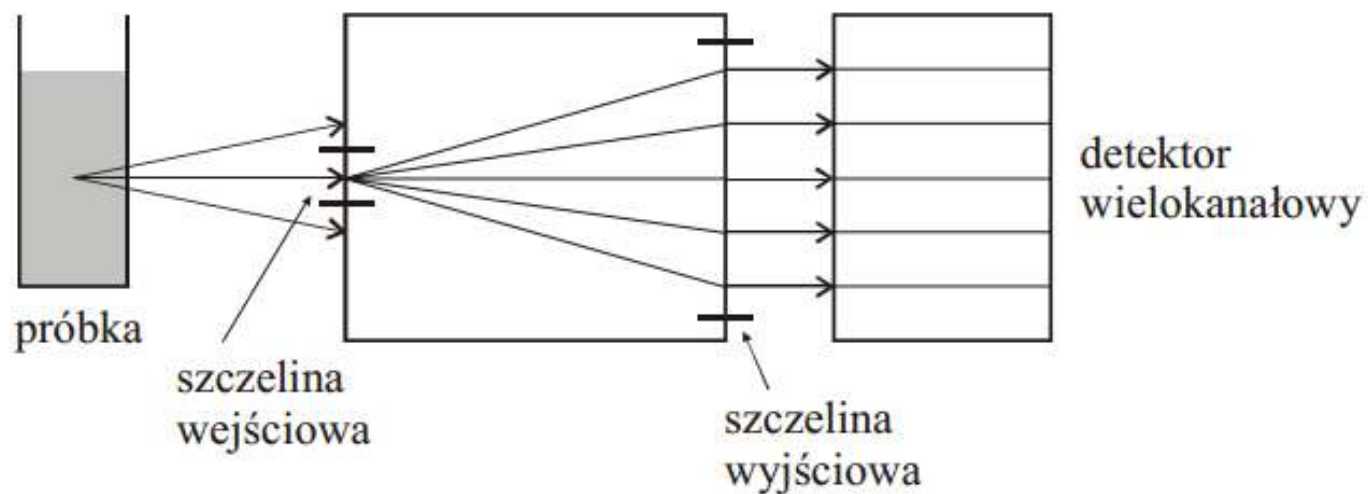
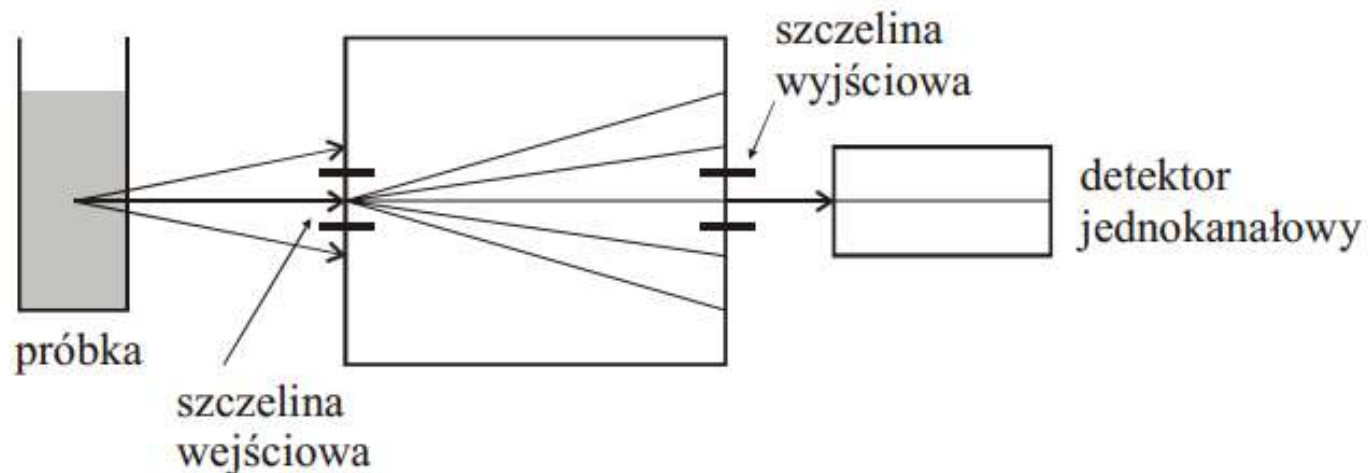
Pozwalają rejestrować jednocześnie natężenie odpowiadające promieniowaniu o różnych długościach fali, a dodatkowo mogą rejestrować przestrzenny rozkład natężenia wzdłuż szczeliny. Kamera CCD pozwala więc realizować nowy typ badań spektroskopowych (ang. imaging spectroscopy), dostarczających informacji nie tylko o rozkładzie widmowym, ale również rozkładzie przestrzennym cząsteczek w próbce wywołujących absorpcję, emisję czy rozpraszanie.

Kamera CCD jest również zbiorem mikroskopowych złącz p-n, ustawionych w formie matrycy, ale katoda jest wspólna (krzem typu p), anody zaś (metal) są izolowane dwutlenkiem krzemu SiO_2 od podłoża krzemowego. Również sposób sczytywania sygnału jest zupełnie inny niż w liniach diodowych PDA (ale to już temat na osobną dyskusję...).



Oczywistą zaletą linijek diodowych PDA i kamer CCD jest dużo krótszy czas pomiaru. Za krótki czas pomiaru płaci się niekiedy cenę, rozdzielczość widmowa jest zwykle mniejsza niż rozdzielczość detektorów jednokanałowych.

RÓŻNICE W SPOSOBIE DETEKCJI STOSOWANEJ W DETEKTORACH JEDNOKANAŁOWYCH I DETEKTORACH WIELOKANAŁOWYCH.



DETEKTORY a transmisja światłowodowa

Detektory stanowią niezwykle ważny element traktu światłowodowego. Są elementem końcowym, który rejestruje sygnał transmitowany przez światłowód. W transmisji światłowodowej stosowane są prawie wyłącznie detektory półprzewodnikowe.

DETEKTORY PÓŁPRZEWODNIKOWE (raz jeszcze)

Najprostszym i najtańszym detektorem półprzewodnikowym jest fotoprzewodnik, czyli cienka warstwa (50-100 μm) z materiału półprzewodnikowego (Si, Ge, InGaAs, CdS, PbS, PbSe) umieszczona między elektrodami. Kiedy na materiał pada światło, przenosi elektrony do pasma przewodnictwa, powodując gwałtowny spadek oporu materiału i wzrost przewodnictwa sygnalizowany jako przepływ prądu w obwodzie zamkniętym lub spadek napięcia na oporze materiału. Fotoprzewodniki, zwane również fotoopornikami, używane masowo w nieskomplikowanych zastosowaniach ze względu na niską cenę (kilkadziesiąt groszy), są mało precyzyjnymi detektorami.

Aby osiągnąć wyższą czułość, liniowość i krótszy czas odpowiedzi, należy wykorzystać złącza p-n wykonane z materiałów półprzewodnikowych zamiast półprzewodników jednego typu używanych w fotoprzewodnikach. Detektor, który wykorzystuje zjawiska zachodzące na złączach p-n, nosi nazwę fotodiody.

ZASADA DZIAŁANIA...

...ogólnie i w skrócie - przy napięciu spolaryzowanym w kierunku zaporowym przez obwód zewnętrzny popłynie prąd, proporcjonalny do natężenia światła padającego na złącze.

Rozróżniamy dwa typy fotodiod: diody fotoprzewodzące i diody fotowoltaiczne.

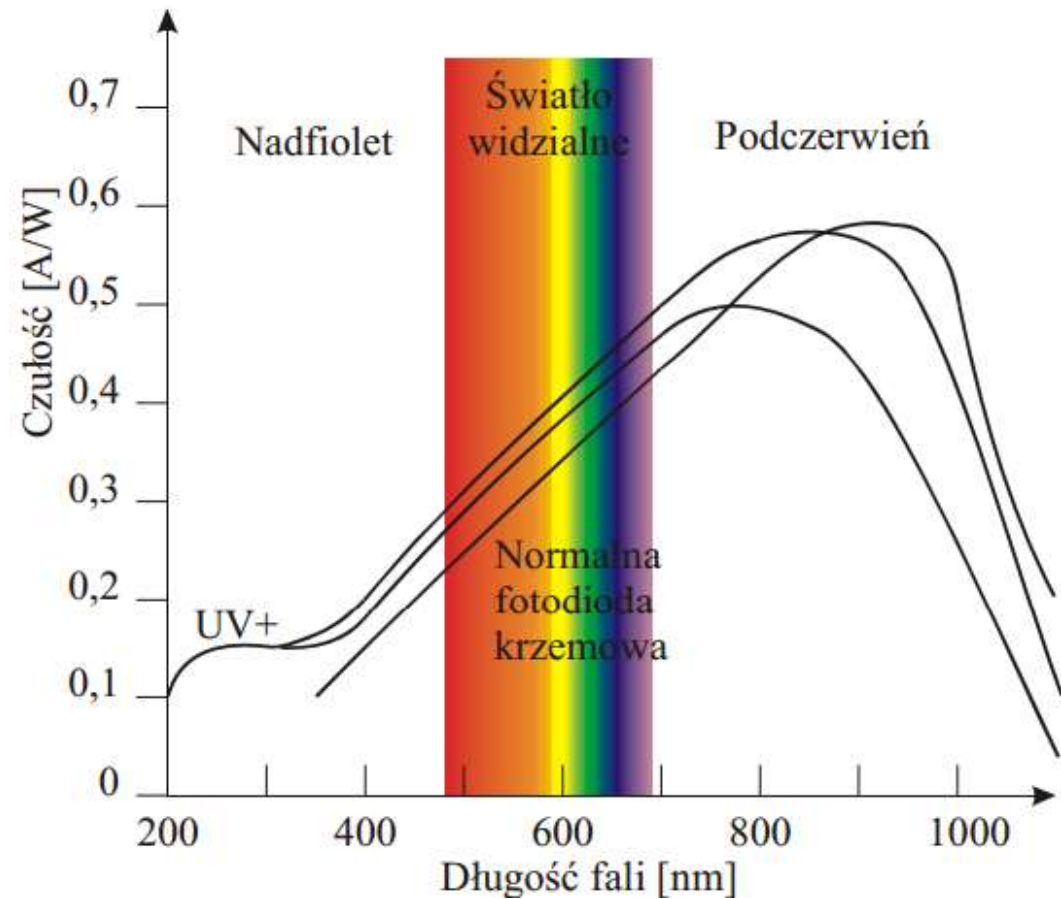
W diodach fotoprzewodzących prąd wywołany światłem zaczyna płynąć natychmiast, dlatego czas odpowiedzi jest dużo krótszy niż w diodach fotowoltaicznych, może wynosić nawet około 10 ps.

Diody fotowoltaiczne mają znacznie dłuższy czas odpowiedzi niż diody fotoprzewodzące, bowiem odpowiednio duży ładunek musi zostać zgromadzony na złączu p-n, aby detektor wykazał spadek napięcia. Ich zaletą jest brak prądu ciemnego wywołującego szumy detektora, co powoduje, iż stosunek sygnału do szumu jest wysoki nawet dla małych natężeń padającego promieniowania.

Fotodiody pozwalają rejestrować światło z szerokiego zakresu widmowego od ultrafioletu do podczerwieni.

ZASTOSOWANIE

Dioda krzemowa nie może być stosowana w II i III oknie optycznym, bowiem jest bezużyteczna do detekcji długości fali 1310 nm i 1550 nm. W obszarze II i III okna stosowane są detektory germanowe, InGaAs oraz InGaAsSb.



Charakterystyka diody krzemowej

DETEKTORY PÓŁPRZEWODNIKOWE - typy

W transmisji światłowodowej służącej do przesyłu dużej ilości informacji w czasie 1 sekundy, ważną rolę zaczyna odgrywać czas odpowiedzi...

Detektory krzemowe są zbyt wolne dla szybkich modulacji. Dla szybkiej transmisji światłowodowej stosowane są dwa typy detektorów:

- **fotodioda PIN** (ang. p – intrinsic – n)
- **fotodioda lawinowa APD** (ang. Avalange Photodiode).

Fotodiody PIN

Mają krótki czas odpowiedzi rzędu nanosekund, mogą być więc wykorzystywane do transmisji sygnałów przy modulacji rzędu GHz.

Drugim ważnym parametrem, który należy brać pod uwagę w detekcji sygnałów przesyłanych światłowodami jest czułość bezwzględna R , czyli natężenie wyjściowe prądu detektora na jednostkę optycznej mocy wejściowej (mA/W) oraz moc równoważna z szumami.

Detektor	czułość bezwzględna, R A/W	moc równoważna z szumami, NEP $W/(Hz)^{1/2}$	Szerokość Widmowa	Material	Długość fali nm	Cena
PIN	0.5	10^{-12}	DC-40 GHz	Si,Ge,InGaAs	600-1800	1-500 \$
APD	0.75	10^{-14}	DC-40 GHz	Si,Ge,InGaAs	600-1800	100- 2000 \$

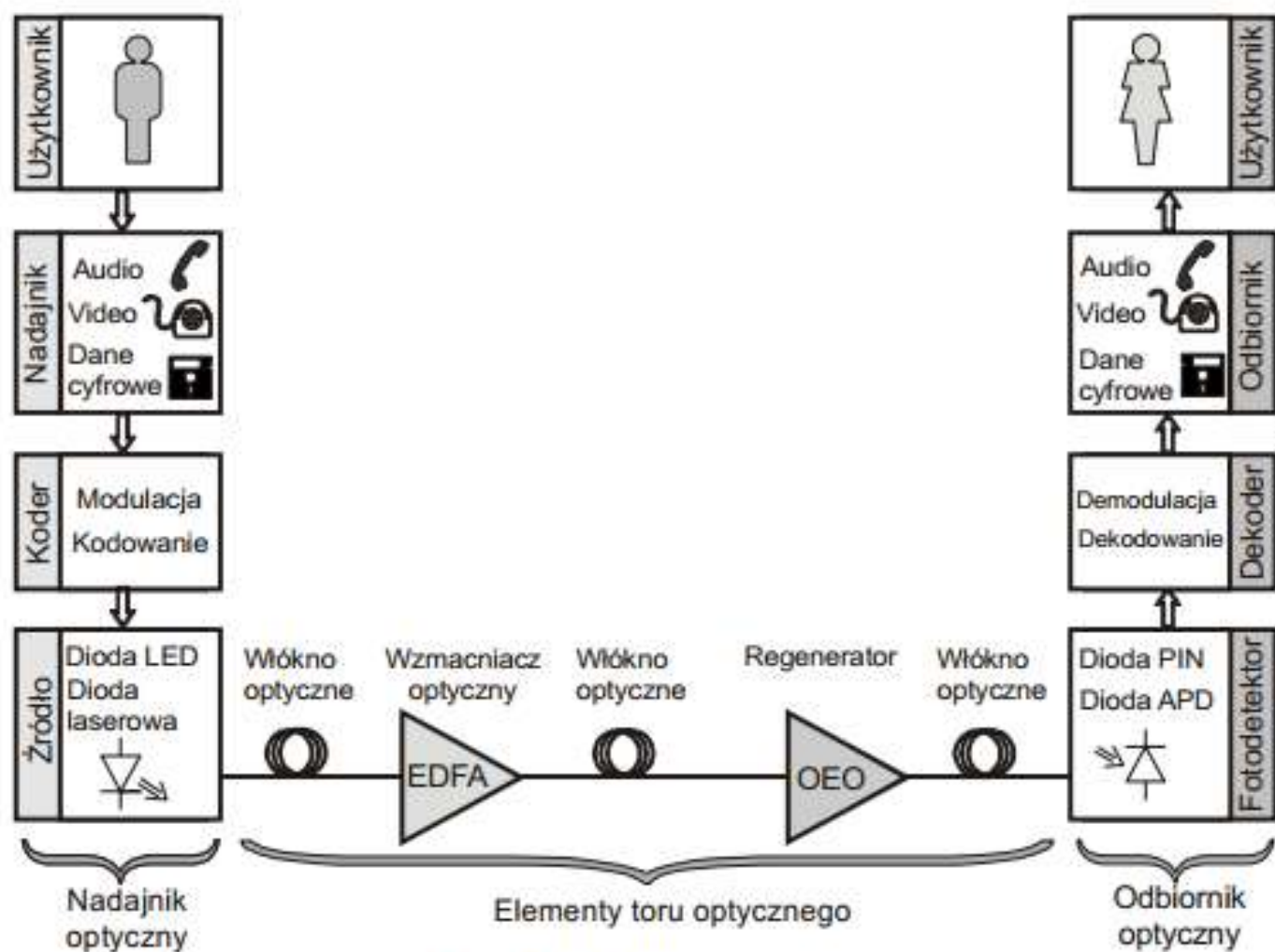
Parametry fotodiody PIN i fotodiody lawinowej APD

Fotodiody lawinowe APD

Dostępne handlowo mają obszar aktywny o promieniu rzędu 0.2 – 5 mm zamknięty hermetycznie w metalowej obudowie, często w zestawie z zasilaczem i wzmacniaczem. Fotodiody lawinowe APD charakteryzują się dużym wzmocnieniem, szybką odpowiedzią, niewielkim prądem ciemnym i dużą czułością w zakresie od UV do bliskiej podczerwieni.

Znajdują zastosowanie w optycznej cyfrowej transmisji światłowodowej, diagnostyce biomedycznej, a w szczególności w aplikacjach wymagających detekcji bardzo słabych sygnałów.

Generalnie, fotodiody PIN są zawsze wybierane jako detektor w systemach transmisji optycznej o mniejszych przepływnościach. Gdy przepływności wzrastają do dziesiątek Gbitów/s, wtedy fotodiody lawinowe zaczynają dominować.



Rys. 2. Ideowy schemat blokowy systemu transmisji optycznej.

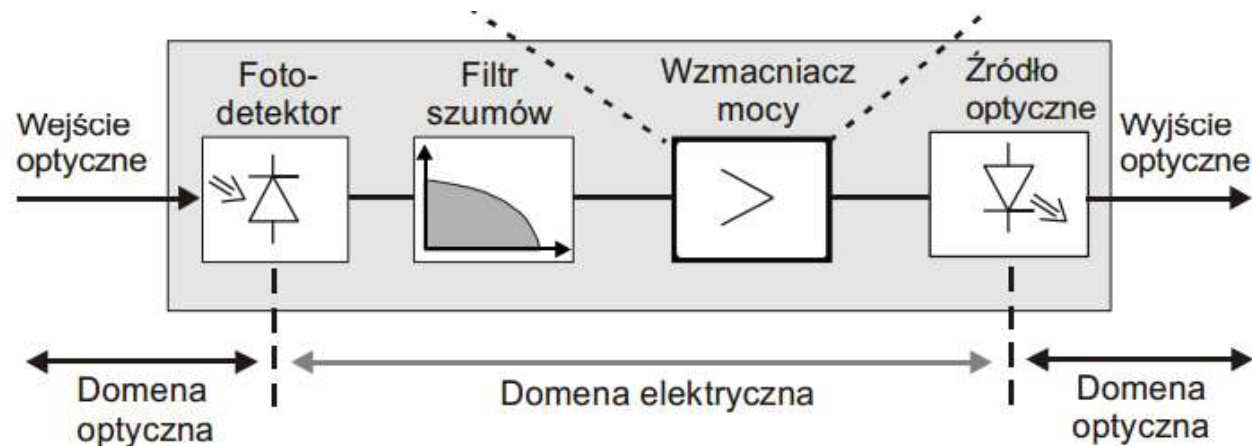
Wzmacniacze w transmisji światłowodowej

Regeneratory optoelektroniczne

Regenerator optoelektroniczny jest urządzeniem wzmacniającym sygnał w domenie elektrycznej. Wejściowy sygnał optyczny jest defekowany poprzez fotodetektor a następnie jest wzmacniany i regenerowany w domenie elektrycznej.

Wyróżniamy trzy podstawowe typy regeneratorów optoelektronicznych:

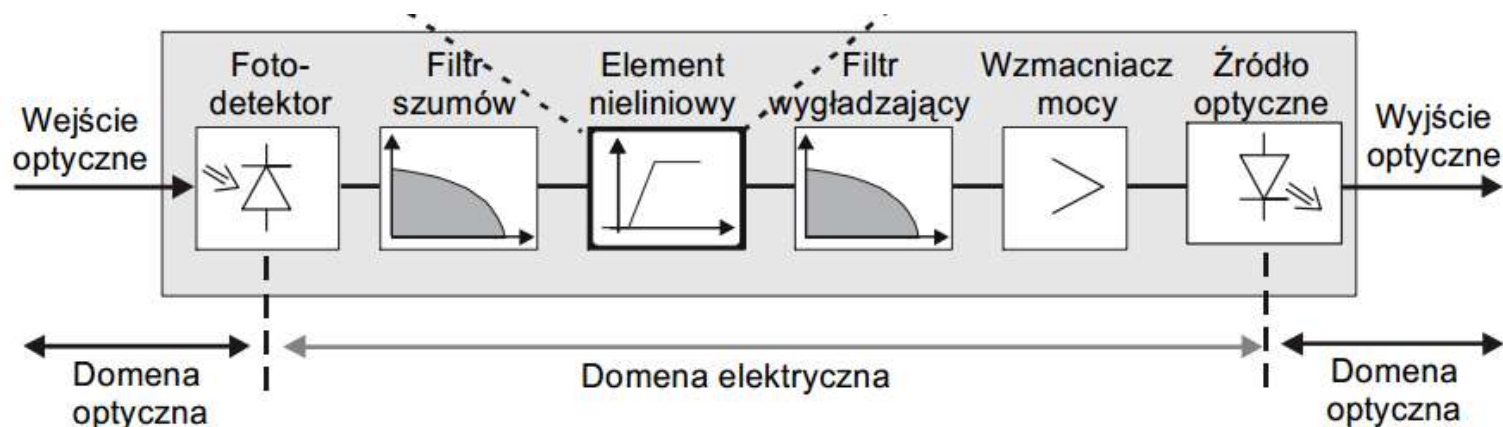
- 1R - ang. Reamplifying -dokonujący liniowego wzmocnienia mocy optycznej,
- 2R - ang. Reamplifying+Reshaping -dokonujący wzmocnienia oraz wyostrożenia krawędzi sygnału optycznego,
- 3R -ang. Reamplifying+Reshaping+Retiming -dokonujący pełnej regeneracji sygnału optycznego.



Rys. 7. Schemat blokowy regeneratora 1R.

Optoelektroniczny regenerator 1R dokonuje liniowego wzmocnienia detekowanej mocy optycznej w dziedzinie elektrycznej, a następnie wykonuje ponowną konwersję sygnału do domeny optycznej. Typowo w tego typu układach za detektorem stosowana jest filtracja szumów, z uwagi na to, że odbierane moce są dość małe.

Wadą tego typu układów jest to, że wzmocnieniu podlega sygnał jak również częściowo składowa szumów. Dlatego też, chętniej stosowane są regeneratory 2R zapewniające oprócz wzmocnienia mocy wyostrzenie krawędzi sygnału.



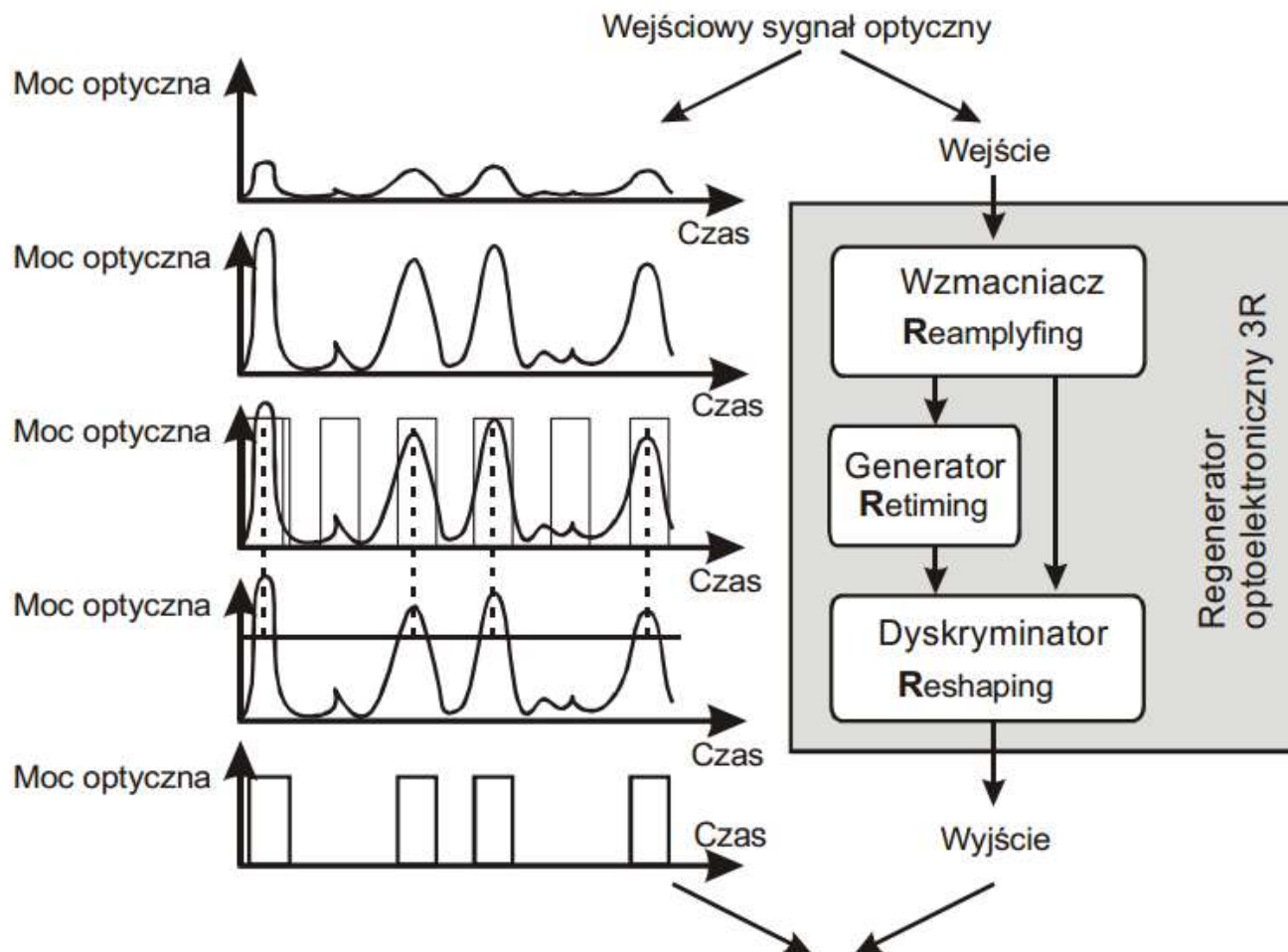
W porównaniu do regeneratora 1R nowym blokiem funkcyjnym jest element nieliniowy, dzięki któremu realizowana jest funkcja wyostrzania krawędzi sygnału, bardzo pożądana zwłaszcza w transmisjach sygnałów binarnych.

Nieliniowa charakterystyka przejściowa zapewnia możliwość odseparowania szumów a zastosowanie filtra wygładzającego zapewnia poprawę liniowości sygnału.

Jednak najczęściej praktycznie wykorzystywanym regeneratorem optoelektronicznym jest regenerator 3R zapewniający pełną regenerację sygnału.

Podobnie jak poprzednie regeneratory wyposażony jest on w fotodetektor zapewniający konwersję z domeny optycznej do elektrycznej oraz na wyjściu w źródło optyczne.

Charakterystycznym nowym elementem regeneratora 3R jest generator, dzięki któremu realizowana jest funkcja synchronizacji sygnałów (ang. Re-timing). Idea działania takiego regeneratora została przedstawiona na rysunku.



Regenerator składa się z trzech podstawowych bloków **wzmacniacza, generatora i dyskryminatora**.

Wzmacniacz liniowy służy do wzmocnienia sygnału wejściowego wchodzącego do regeneratora 3R po wcześniejszej konwersji sygnału optycznego na elektryczny.

Wzmocniony we wzmacniaczu sygnał służy do synchronizacji wewnętrznego generatora oraz jako sygnał odniesienia dla dyskryminatora poziomów. Na wyjściu generowane są zsynchronizowane te impulsy generatora, dla których poziom mocy optycznej jest **powyżej progu dyskryminatora**.

Elektryczny sygnał wyjściowy jest następnie konwertowany na optyczny w przetworniku elektrooptycznym. Najczęściej jest nim półprzewodnikowa dioda laserowa. Zastosowanie regeneratora optoelektronicznego ograniczone jest zazwyczaj do cyfrowych systemów transmisji.

Włóknowe wzmacniacze optyczne

W celu zwiększenia zasięgu transmisji światłowodowej obecnie bardzo szeroko są stosowane wzmacniacze światłowodowe.

Ich przewagą nad regeneratorami optoelektronicznymi jest fakt, że sygnał we wzmacniaczu jest sygnałem optycznym i nie podlega konwersji na sygnały elektryczne.

Zaletą jest także szerokie pasmo pracy, dzięki czemu mogą one wzmacniać jednocześnie wiele kanałów komunikacyjnych o ile całkowite pasmo zajmowane przez te kanały zawiera się w paśmie wzmacniacza.

Idea...

..wzmacniacza światłowodowego polega na włączeniu w tor optyczny odcinka włókna domieszkowanego pierwiastkami ziem rzadkich.

Typowo stosowane są domieszki erbu w przypadku **wzmacniacza EDFA** (ang. Erbium Doped Fiber Amplifier) pracującego w III oknie transmisji lub domieszki tulu w przypadku wzmacniacza TDFA (ang. Thulium Doped Fiber Amplifier) pracującego w II oknie transmisji szkła.

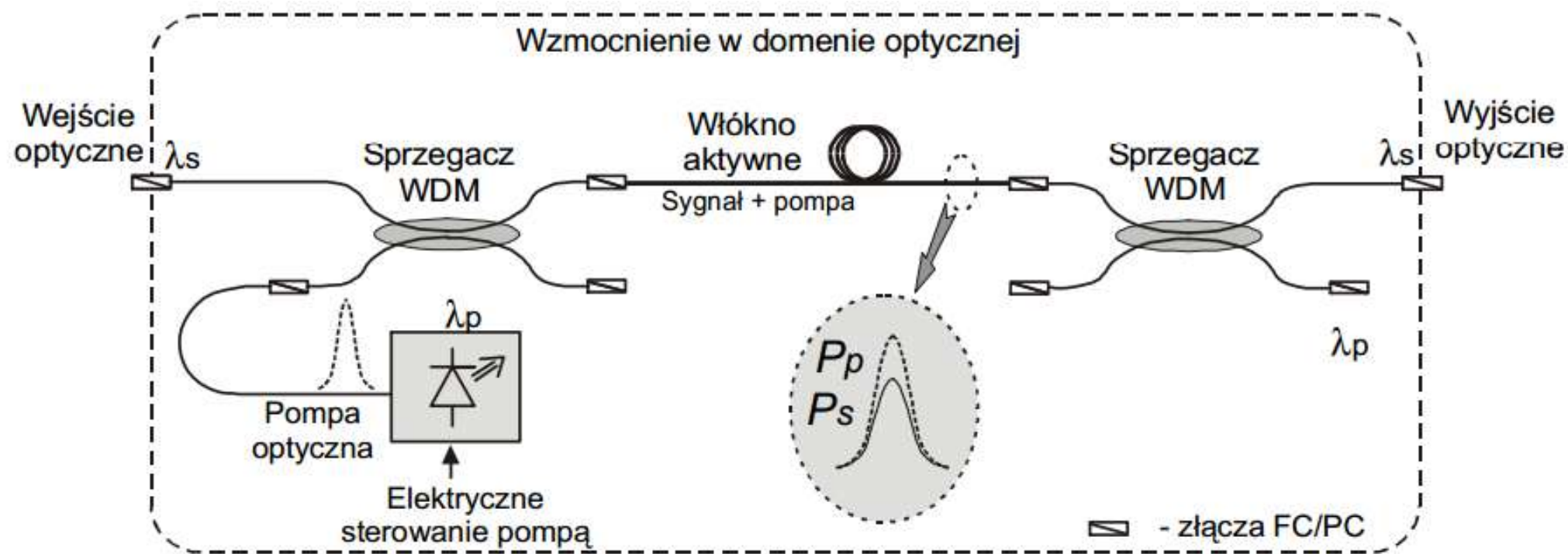
Transmisja na długości fali 1550nm jest najbardziej interesująca z powodu najniższego tłumienia, dlatego omawiając zasadę działania ograniczamy się do **wzmacniacza EDFA**, który jest dziś powszechnie stosowany.

Jak to działa...

Podstawowym warunkiem działania wzmacniacza optycznego jest obecność na tyle dużej liczby atomów czy cząsteczek w odpowiednim stanie wzbudzonym, by emisja wymuszona przeważała nad emisją spontaniczną (rysunek poglądowy na następnej stronie).

Oznacza to, że na wyższym poziomie energetycznym musi się znajdować więcej atomów, niż na poziomie niższym. Jest to tak zwana inwersja obsadzeń. Odwrócenie obsadzenia można uzyskać na kilka sposobów.

Jednym z nich jest pompowanie optyczne ośrodka aktywnego zewnętrznym laserem mocy tzw. pompą optyczną...

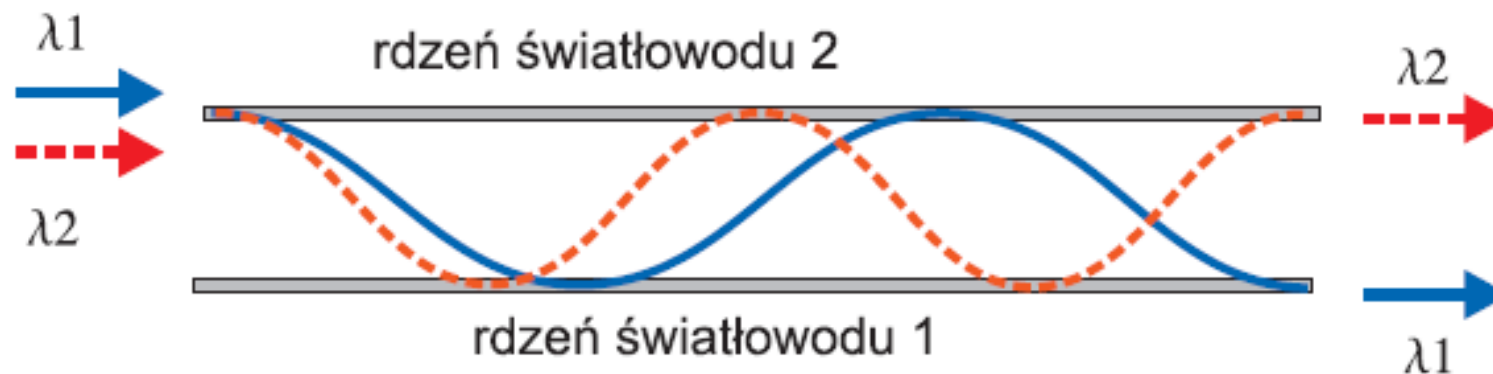


Rys. 10. Schemat laboratoryjnego wzmacniacza typu EDFA [15].

Do konstrukcji wzmacniacza oprócz włókna aktywnego i pompy optycznej wykorzystuje się **sprzęgacze** typu **WDM**.

Sprzęgacze WDM

Sprzęgacze z podziałem długości fali (ang. wavelength division multiplexing – WDM coupler) to sprzęgacze zoptymalizowane pod kątem łączenia (lub rozdzielania) sygnałów o różnych długościach fali z różnych portów (lub do różnych portów). Odgrywają one bardzo istotną rolę w sieciach WDM, gdzie sygnały o różnych długościach fal są łączone lub rozdzielane przed tym nim zostaną skierowane do odpowiednich adresatów. Zasada działania powszechnie używanych sprzęgaczy WDM została przedstawiona na rysunku.



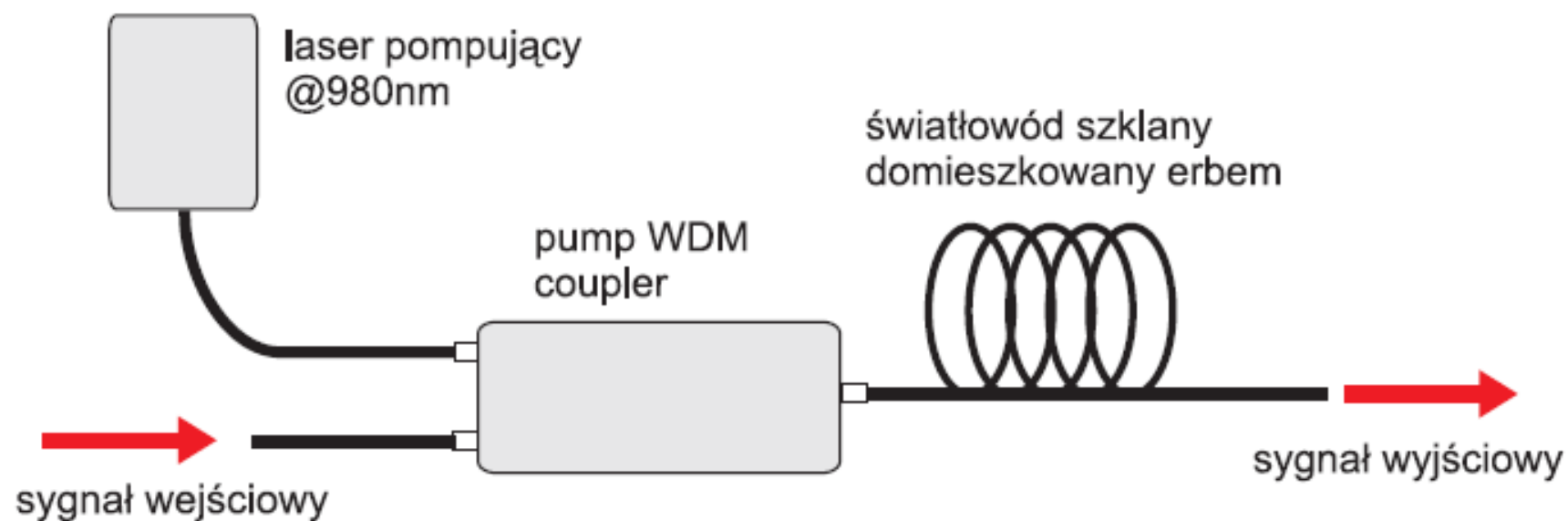
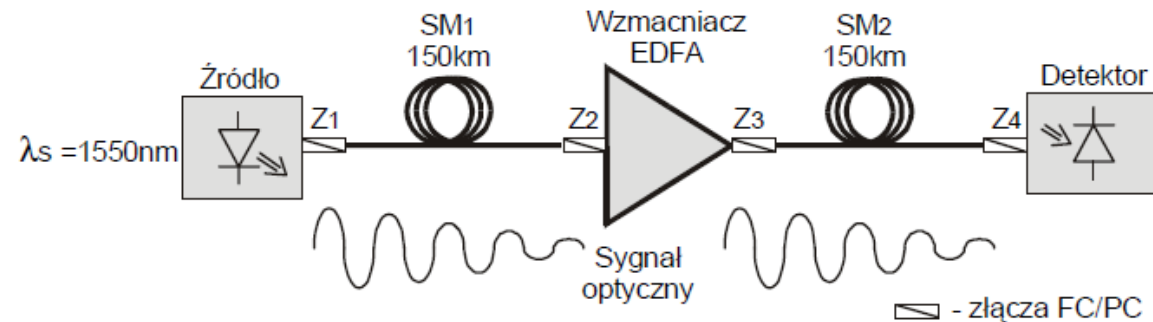


Figure 7.3: Układ klasycznego wzmacniacza EDFA.

Wzmocnienie na przykładzie

Schemat ideowy przykładowego toru optycznego



Do obliczeń przyjęto tłumienie światłowodu na poziomie 0.2dB/km.

Parametr	Wartość	Bilans mocy [dBm]
Moc źródła	$2\text{mW} = 10\log(P_s/1\text{mW})$	+3dBm
Tłumienie złącza Z ₁	0.15	-0.15dB
Tłumienie 150km	$150 \cdot 0.20$	-30dB
Tłumienie złącza Z ₂	0.15	-0.15dB
Wzmocnienie wzmacniacza	25dB	+25dB
Tłumienie złącza Z ₃	0.15	-0.15dB
Tłumienie 100km	$150 \cdot 0.20$	-30dB
Tłumienie złącza Z ₄	0.15	-0.15dB
Margines projektowy	6	-6dB
Moc na wyjściowa		-38.6dBm

Bilans mocy toru optycznego

Jak wynika z przeprowadzonego bilansu po przeliczeniu moc dochodząca do detektora wynosi 0,138mW. Zastosowanie wzmacniacza optycznego znacznie zwiększa drogę transmisji dzięki czemu moc odbieranego na detektorze promieniowania jest znacznie ponad progiem detekcji oraz ponad poziomem szumów.