

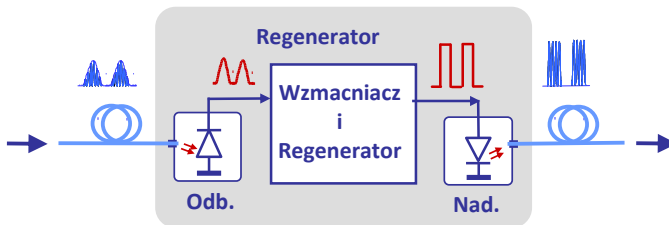
## Rozdział 5

# Wzmacniacze sygnałów optycznych

### 5.1. Wprowadzenie

Fala elektromagnetyczna, poruszając się w wolnej przestrzeni między antenami czy też w przewodnicy falowej, jest zwykle silniej lub słabiej tłumiona. Rezultatem procesu zmniejszania mocy transmitowanego sygnału jest najczęściej konieczność użycia wzmacniaczy. Rozwój technologii elementów półprzewodnikowych wyposażył konstruktorów w szeroką gamę rozmaitych układów wzmacniających w szerokim paśmie, od częstotliwości akustycznych do pasma fal milimetrowych. Podstawowym, aktywnym przyrządem układów wzmacniających jest tranzystor. Jego rozmaite struktury pozwalają wzmacniać sygnały w paśmie do 300 GHz, a uzyskiwane poziomy mocy w paśmie fal centymetrowych przekraczają dziesiątki kilowatów.

Światłowód jest przewodnicą falową o wyjątkowo małym tłumieniu. Niemniej przy transmisji sygnału optycznego na duże odległości jego moc słabnie i zbliża się do poziomu szumów. Koniecznym staje się powiększenie mocy transmitowanego sygnału optycznego. Problem bezpośredniego wzmacniania sygnałów optycznych długo pozostawał nierozwiązany. Radzono sobie, wykorzystując ideę układu regeneratora pokazaną na rys. 5.1.



**Rys. 5.1.** Idea układu regeneratora sygnału optycznego składającego się z odbiornika optycznego, wzmacniaczy elektronicznych, generatora impulsów i nadajnika laserowego.

W układzie tym do fotodiody odbiornika doprowadzony jest światłowodem sygnał optyczny modulowany impulsowo, który należy wzmacnić. Po fotodetekcji słabe impulsy elektryczne wzmacniane są przez łańcuch wzmacniaczy tranzystorowych. Elektroniczny układ w takt odbieranych impulsów generuje impulsy prądu kierowane do lasera, który jest nadajnikiem. Impulsy mocy optycznej generowane przez laser, o mocy wielokrotnie większej niż docierające do odbiornika, kierowane są następnie do światłowodu wyjściowego.

Układy regeneratorów będą dokładniej opisane w jednym z kolejnych rozdziałów. W tym miejscu można dodać, że gdy łączem światłowodowym transmitowane są sygnały optyczne o różnych długościach fali, co jest zabiegiem stosowanym w procesie multipleksacji, to układ regeneratora znacznie się komplikuje. Problemem jest także transmisja sygnałów analogowych. Demodulacja sygnału optycznego, jego wzmocnienie na drodze elektronicznej i ponowna modulacja mocy optycznej lasera są możliwe, ale w trakcie tych procesów stosunek sygnału do szumu ulegnie silnej degradacji.

Prace nad rozwiązaniem tego problemu zaowocowały w końcu kilkoma ciekawymi rozwiązaniami, które zostaną opisane w tym rozdziale. Ponieważ tranzystory nie mogą być użyte w pasmach optycznych, to rozwiązań poszukiwano na drodze budowy aktywnych optycznych przewodnic falowych, które będą wzmacniać transmitowany sygnał optyczny, dzięki czemu skonstruowano bardzo użyteczne przyrządy.

## 5.2. Wiadomości podstawowe

### 5.2.1. Klasyfikacja wzmacniaczy optycznych

W rozdziale 3 opisano zasady działania heterozłączowych laserów półprzewodnikowych. W przyrządach tych, pompowanych prądowo, utworzono warstwę aktywną, która po jej umieszczeniu w obszarze rezonatora staje się źródłem promieniowania optycznego. Postawiono pytanie, czy można wykorzystać warstwę aktywną do utworzenia struktury wzmacniającej transmitowany przez nią sygnał optyczny. Idąc tą drogą, zbudowano optyczne wzmacniacze półprzewodnikowe oparte na efektach wykorzystywanych w strukturach laserów półprzewodnikowych.

Droga do uaktywnienia ośrodka prowadzi przez uzyskanie inwersji obsadzeń. Zastosowano w kolejnych rozwiązaniach rdzeń światłowodu jednomodowego domieszko- wany wybranymi atomami, które pobudzone promieniowaniem pompy optycznej czynią przewodnicę aktywną. Pobudzone atomy domieszek oddają swoją energię przepływają- cemu sygnałowi optycznemu w procesie emisji wymuszonej i wzmacniają sygnał optyczny transmitowany przez światłowód. W ten sposób powstały wzmacniacze światłowodowe.

Opisane w tym rozdziale wzmacniacze optyczne podzielono – ze względu na zasadę działania – na dwie podstawowe grupy:

- wzmacniacze półprzewodnikowe SOA (ang. *Semiconductor Optical Amplifiers*):
  - ✓ wzmacniacze z rezonatorem Fabry'ego-Perota,
  - ✓ wzmacniacze z falą bieżącą;
- wzmacniacze światłowodowe:
  - ✓ wzmacniacze światłowodowe EDFA (ang. *Erbium Doped Fiber Amplifier*) i pokrewne,
  - ✓ wzmacniacze wykorzystujące efekt Ramana.

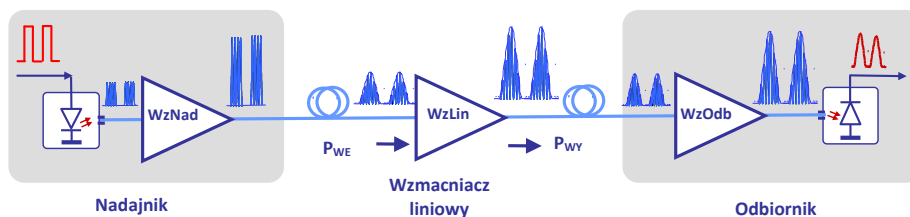
Wymienione wzmacniacze zostaną kolejno przedstawione.

## 5.2.2. Trzy główne typy zastosowań wzmacniaczy optycznych

Wzmacniacze optyczne są ważnymi elementami sieci światłowodowych. Ich obecność poprawia istotnie parametry transmisji sygnału, upraszcza strukturę sieci, poprawia też parametry szumowe. Wzmacniacze optyczne mogą pełnić w torze łącza optycznego różne role. Na rys. 5.2 pokazano schemat układu takiego łącza. Wzmacniacze optyczne umieszczono w tym torze w trzech różnych miejscach.

Naturalnym zadaniem wzmacniacza optycznego jest zwiększenie mocy wyjściowej nadajnika. W tym przypadku umieszczony za laserem wzmacniacz mocy zwiększa o 20–30 dB poziom mocy optycznej nadajnika. Decydująca w tym przypadku jest moc wyjściowa wzmacniacza, a problem szumów jest mało istotny.

Aby zwiększyć poziom mocy sygnału osłabionego transmisją, w torze umieszcza się optyczny wzmacniacz liniowy. Najważniejszym parametrem jest w tym przypadku duże wzmocnienie wzmacniacza liniowego. Na kolejnym miejscu należy umieścić niski poziom szumów, aby stosunek sygnał–szum nie uległ znacznej degradacji. Częstym rozwiązaniem jest rozmieszczenie w torze, w odpowiednio dobranych odległościach, kilku wzmacniaczy liniowych.



**Rys. 5.2.** Tor światłowodowego łącza optycznego ze wzmacniaczami optycznymi włączonymi w nadajniku, odbiorniku i w linii transmisyjnej światłowodu.

Wzmacniacz optyczny umieszczony w odbiorniku istotnie zwiększa jego czułość. W tym przypadku najważniejszym parametrem jest niski poziom szumów, potem duże wzmocnienie, natomiast poziom mocy wyjściowej ma tu mniejsze znaczenie.

Nadajniki z laserem półprzewodnikowym i wzmacniaczem mocy wykonywane są często jako fotoniczne układy scalone. Podobnie odbiorniki zawierające wzmacniacz niskoszumny i fotodiody można wykonać na podłożu materiału półprzewodnikowego.

## 5.2.3. Podstawowe parametry wzmacniaczy optycznych

Opisywane w tym rozdziale przyrządy mają bardzo różne wymiary; długość  $L$  obszaru aktywnego wzmacniacza półprzewodnikowego nie przekracza zwykle 1 mm, światłowody aktywne wzmacniaczy EDFA osiągają długość kilkunastu metrów, długość światłowodów

Ramana mierzy się w kilometrach. Ich cechą wspólną jest obecność przewodnicy aktywnej, na odcinku której sygnał optyczny jest wzmacniany. Wzmocnienie uzyskuje się przez inwersję obsadzeń między dwoma poziomami energii elektronów, jako rezultat pracy układu pompy. Opierając się na tym podobieństwie, można przeprowadzić wspólne dla nich rozważania o ich najważniejszych parametrach.

Jednym z nich jest wzmocnienie  $G$  mocy sygnału optycznego, opisane zależnością (5-1). Jest to stosunek mocy  $P_{WY}$  optycznego sygnału na wyjściu wzmacniacza, do mocy  $P_{WE}$  na jego wejściu, zgodnie z oznaczeniami z rys. 5.2. Dla uproszczenia przyjmujemy, że sygnał jest monochromatyczny, a światłowód jednomodowy.

$$G(f, P_{WY}) = \frac{P_{WY}}{P_{WE}}; \quad (5-1)$$

Tak zdefiniowane wzmocnienie jest funkcją kilku zmiennych. Najbardziej interesujące są zależności od częstotliwości  $f$  sygnału optycznego (długości fali) i od poziomu mocy wyjściowej  $P_{WY}$ . Moc sygnału optycznego  $P(z)$  propagowanego wzdłuż obszaru aktywnej przewodnicy, rośnie od wartości początkowej  $P(z=0) = P_{WE}$ , wykładniczo z jej odległością  $z$ , zgodnie z zależnością (5-2):

$$P(z) = P_{WE} \exp(gz); \quad (5-2)$$

We wzorze powyższym  $g(f)$  jest współczynnikiem wzmocnienia dla obszaru aktywnej. Jego wartość jest sumą stałej tłumienia oraz składnika przeciwnego znaku warunkującego wzmocnienie, który to składnik zależy od pracy pompy. Można teraz napisać proste wyrażenie na wzmocnienie  $G(f)$  wzmacniacza, którego długość obszaru aktywnej równa jest  $L$ :

$$G(f) = \exp[g(f)L]; \quad (5-3)$$

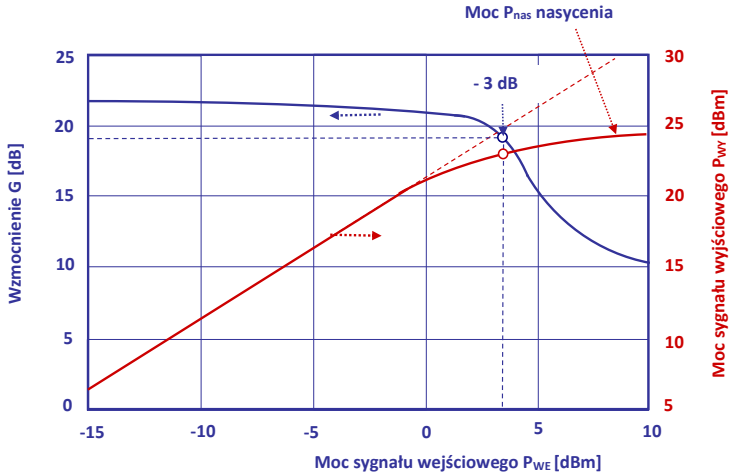
Charakterystyki wzmocnienia związane są zależnością współczynnika wzmocnienia  $g(f, P_{WY})$  od częstotliwości  $f$  i poziomu mocy wyjściowej  $P_{WY}$ . Opisuje go, dla określonych warunków pracy układu pompy, związek (5-4).

$$g(f, P_{WY}) = \frac{g_0}{1 + 4\pi^2(f - f_0)^2 T_2^2 + P_{WY}/P_{nas}}; \quad (5-4)$$

We wzorze tym  $g_0$  jest szczytową wartością współczynnika wzmocnienia, częstotliwość  $f_0$  odpowiada różnicy energii między poziomami energetycznymi, między którymi zachodzi emisja wymuszona,  $T_2$  jest dipolowym czasem relaksacji (zwykle  $T_2 < 1$  pS), a moc  $P_{nas}$  jest tzw. moc nasycenia, czyli maksymalna moc wyjściowa wzmacniacza – rys. 5.3.

Zależność (5-4) upraszcza się do postaci (5-5), jeśli przyjmując pracę przy małym poziomie mocy wyjściowej:

$$g(f) = \frac{g_0}{1 + 4\pi^2(f - f_0)^2 T_2^2}; \quad (5-5)$$



**Rys. 5.3.** Charakterystyki wzmacniacza optycznego przy dużych poziomach mocy wejściowej  $P_{WE}$ . Linia granatowa – zależność wzmocnienia  $G(P_{WE})$ , linia czerwona – zależność mocy wyjściowej  $P_{WY}(P_{WE})$ .

Wzmocnienie małosygnałowe wzmacniacza osiąga wartość maksymalną  $G_0$ , dla częstotliwości pracy  $f_0$ . Zwiększenie bądź zmniejszenie częstotliwości sygnału wejściowego powoduje zmniejszenie wartości wzmocnienia. Można obliczyć pasmo pracy wzmacniacza  $\Delta f_{3dB}$  między częstotliwościami, dla których spada ono do połowy. Otrzymuje się zależność (5-6). Ponieważ dipolowy czas relaksacji jest bardzo mały, to obliczone pasmo pracy wynosi kilka, kilkanaście teraherców.

$$\Delta f_{3dB} = \frac{1}{\pi T_2} \sqrt{\frac{\ln 2}{\ln(G_0/2)}}; \quad (5-6)$$

Z zależności powyższej można wyciągnąć wniosek, że wzmacniacze optyczne są wzmacniaczami szerokopasmowymi. W ich prostej strukturze nie ma obwodu rezonansowego. W kolejnych punktach opisana zostanie możliwość konstrukcji wąskopasmowego, selektywnego wzmacniacza optycznego.

Ważnymi charakterystykami wzmacniacza są zależności  $G(P_{WE})$  i  $P_{WY}(P_{WE})$  obrazujące pracę przy dużym poziomie sygnału wejściowego. Przykład takich charakterystyk pokazano na rys. 5.3. Charakterystyka wyróżniona linią granatową jest typową dla wzmacniacza zależnością wzmocnienia od poziomu mocy wejściowej. W dużym zakresie wartości mocy wejściowych wzmocnienie jest praktycznie stałe. Wzrost mocy wejściowej powyżej określonego poziomu powoduje zmniejszenie wartości wzmocnienia. Szczególnym parametrem wzmacniacza jest poziom mocy wejściowej, dla którego wzmocnienie maleje o 3 dB. Jego wartość określa zakres liniowej pracy wzmacniacza. Charakterystyka wyróżniona linią czerwoną pokazuje zależność  $P_{WY}(P_{WE})$  mocy wyjściowej od poziomu mocy wejściowej. W szerokim zakresie pracy charakterystyka ta jest liniowa. Gdy przy dużych poziomach mocy

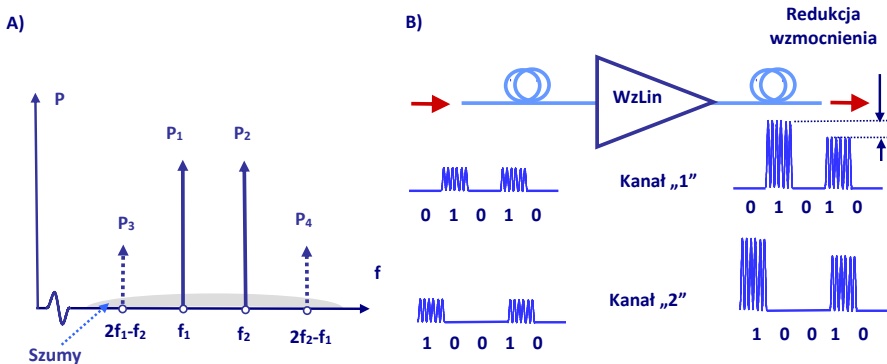
wejściowej wzmacnienie zaczyna spadać, charakterystyka ta przestaje być liniowa, a moc wyjściowa osiąga poziom mocy nasycenia  $P_{nas}$ .

Moc nasycenia jest kolejnym ważnym parametrem wzmacniacza. Jak wykazały badania, zależność wzmacnienia od poziomu mocy ma przebieg dający się z dobrą dokładnością opisać uniwersalną zależnością (5-7), gdzie  $G_0$  jest wzmacnieniem dla małych sygnałów.

$$G(P_{WY}) = \frac{G_0}{1 + \frac{P_{WY}}{P_{nas}}}; \quad (5-7)$$

Projektując warunki pracy wzmacniaczy optycznych w łączach światłowodowych, zakłada się pracę przy możliwie największych poziomach mocy. Jednakże praca przy dużych poziomach mocy może być źródłem nieakceptowalnych zniekształceń.

W typowych warunkach pracy łączem optycznym transmitowane są sygnały o różnych długościach fali. Przypadek efektów transmisji sygnałów o częstotliwościach  $f_1$  i  $f_2$  i mocach  $P_1$  i  $P_2$  ilustruje rys. 5.4A. Jeśli suma mocy obu sygnałów jest na tyle duża, że wzmacniacz pracuje w warunkach nieliniowych, to w widmie sygnału na wyjściu wzmacniacza pojawią się produkty intermodulacji, w tym przypadku nowe prążki o częstotliwościach  $2f_1 - f_2$  i  $2f_2 - f_1$ . Jeśli liczba transmitowanych sygnałów będzie większa, to w każdym z transmitowanych kanałów pojawią się sygnały pochodzące od sąsiadów. Tak więc suma mocy wszystkich sygnałów musi być na tyle mała, by poziom produktów intermodulacji był akceptowalny.



**Rys. 5.4.** Efekty nieliniowej pracy wzmacniacza przy dużym poziomie sygnału. A) Powstawanie zniekształceń intermodulacyjnych przy pracy dwutonowej. B) Ilustracja powstania efektów przesłuchu przy transmisji dwukanałowej.

Inny typ efektów wywołanych pracą przy dużym poziomie sygnałów ilustruje rys. 5.4B. Wzmacniacz wzmacnia ciągi impulsów pochodzących z dwóch różnych źródeł, kanał „1” i kanał „2”. Pokazano tutaj rezultaty wzmacniania pięciu kolejnych impulsów. W dwóch kolejnych okresach wzmacniane są pojedyncze impulsy w każdym kanale. W okresie trzecim

nie ma sygnału, natomiast w okresie czwartym wzmacniane są sygnały w obu kanałach. Suma ich mocy jest na tyle duża, że wzmacniacz pracuje w zakresie nieliniowym i jego wzmacnienie maleje. W rezultacie para impulsów jest wzmacniona słabiej, powstały tzw. przesłuchy między kanałami, co jest efektem niepożądanym.

Ważnym parametrem wzmacniacza jest jego współczynnik  $F_N$  szumów. Współczynnik  $F_N$  wskazuje jak zmienił się, zmalał, stosunek mocy sygnału do mocy szumu na wejściu wzmacniacza  $P_{WE}/N_{WE290}$  w porównaniu do jego wartości  $P_{WY}/N_{WY}$  na wyjściu. Zależność definicyjną zapisuje się w postaci (5-8).

$$F_N = \frac{P_{WE}/N_{WE290}}{P_{WY}/N_{WY}} = \frac{N_{WY}}{GN_{WE290}}; \quad (5-8)$$

We wzorze tym oznaczono poziom mocy szumów na wejściu i na wyjściu jako  $N_{WE290}$  i  $N_{WY}$ . Ten pierwszy jest poziomem szumu termicznego odpowiadającego – zgodnie z definicją – temperaturze 290 K. Rozważania dla wzmacniaczy wykorzystujących inwersję obsadzeń na dwóch poziomach energetycznych prowadzą do prostej, choć przybliżonej zależności:

$$F_N = 2 \frac{N_2}{N_2 - N_1} \frac{G - 1}{G}; \quad (5-9)$$

We wzorze  $N_2$  i  $N_1$  są liczbami atomów na poziomach energetycznych wyższym i niższym.

W warstwie aktywnej pobudzonego falowodu zachodzi proces emisji spontanicznej. Część promieniowania spontanicznego opuszcza prowadnicę, ale część kierowana jest wraz z sygnałem wzmacnianym. Spontaniczne promieniowanie jest wzmacniane i pojawia się w porcie wyjściowym niezależnie od obecności sygnału w porcie wejściowym.

Efekt wzmacnienia promieniowania spontanicznego ASE (ang. *Amplified Spontaneous Emission*) znacząco zwiększa poziom szumów i wymusza ograniczanie wartości wzmacnienia wzmacniacza.

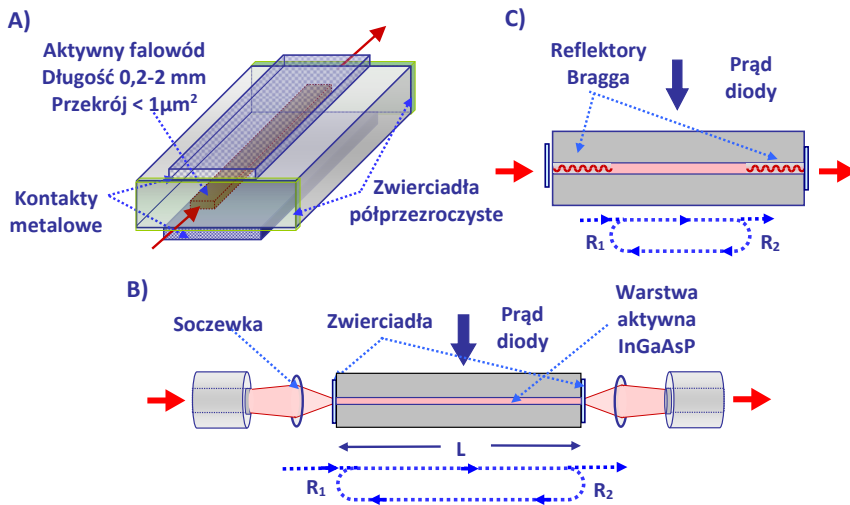
Omówione wyżej właściwości wzmacniaczy optycznych mają charakter w dużym stopniu znormalizowany, uniwersalny. Wskazują one na to, jak wspomniano wyżej, że wzmacniacze te są z natury rzeczy szerokopasmowe. Ten typ pracy jest najbardziej pożądanym, gdyż zwykle światłowodem transmitowane są sygnały o różnych długościach fali, wygenerowane przez różne lasery. Jeżeli potrzebny jest wzmacniacz wąskopasmowy, to należy wprowadzić do układu odpowiedni rezonator. W rozdziale o laserach przedstawiono sposoby rozwiązania tego problemu.

## 5.3. Wzmacniacze półprzewodnikowe

### 5.3.1. Wzmacniacze półprzewodnikowe z rezonatorem

Optyczny wzmacniacz półprzewodnikowy SOA (ang. *Semiconductor Optical Amplifier*) jest półprzewodnikowym laserem pracującym poniżej progu oscylacji. W rozdziale 3 omówiono

szczegółowo struktury i zasady działania laserów półprzewodnikowych oraz warunki, których spełnienie prowadzi do powstania oscylacji. W punkcie 3.4.2 przedstawiono laser z rezonatorem Fabry'ego-Perota. Warunek oscylacji tego przyrządu opisano tam równaniem (3-2). Zgodnie z tym warunkiem oba zwierciadła, między którymi umieszczono obszar aktywny, muszą silnie odbijać promieniowanie optyczne. Współczynniki odbicia, których miarą są współczynniki  $R_1$  i  $R_2$ , mają duże, bliskie 1, wartości. Jeśli warunek oscylacji nie jest spełniony, to ośrodek aktywny jest źródłem promieniowania spontanicznego. Wprowadzenie z zewnątrz do rezonatora Fabry'ego-Perota promieniowania o odpowiedniej długości fali skutkuje tym, że sygnał optyczny poruszający się wzdłuż aktywnego falowodu wymusza emisję i ulega wzmocnieniu; mamy do czynienia z procesem wzmacniania.



**Rys. 5.5.** Ilustracja działania optycznego wzmacniacza półprzewodnikowego. A) uproszczona struktura diodowego wzmacniacza półprzewodnikowego z półprzezroczystymi zwierciadłami. B) Wzmacniacz półprzewodnikowy z rezonatorem Fabry'ego-Perota i układami doprowadzenia i wyprowadzenia sygnałów. C) Optyczny wzmacniacz diodowy z rezonatorem między reflektorami Bragga.

Na rys. 5.4 przedstawiono ilustrację działania wzmacniacza półprzewodnikowego. Rysunek 5.4A ilustruje uproszczoną strukturę półprzewodnikowej heterozłączowej diody wzmacniającej. Dioda spolaryzowana jest w kierunku przewodzenia, a płynący prąd  $I$  aktywizuje warstwę zbudowaną w kształcie cienkiego falowodu. Obszar aktywny, w którym zachodzi proces wzmocnienia ma niewielką długość  $L$ . Na jego obu końcach umieszczono zwierciadła półprzezroczyste o odpowiednio dobranych współczynnikach odbicia  $R_1$  i  $R_2$ .

Jeśli do falowodu aktywnego doprowadzić sygnał optyczny, to zgodnie z zależnością (5-3) jego moc w trakcie propagacji jest wykładniczo wzmacniana. Wzmocnienie mocy – przy warunku pracy małymi sygnałami – dla przepływu w jedną stronę na długości  $L$  falowodu, opisze się równaniem (5-10):



$$G_{(1)} = \exp[(g_A - \alpha_0)L]; \quad (5-10)$$

We wzorze tym  $g_A(l)$  jest stałą wzmocnienia ośrodka aktywnego, zależną od prądu diody, a  $\alpha_0$  jest stałą tłumienia ośrodka bez obecności pompowania.

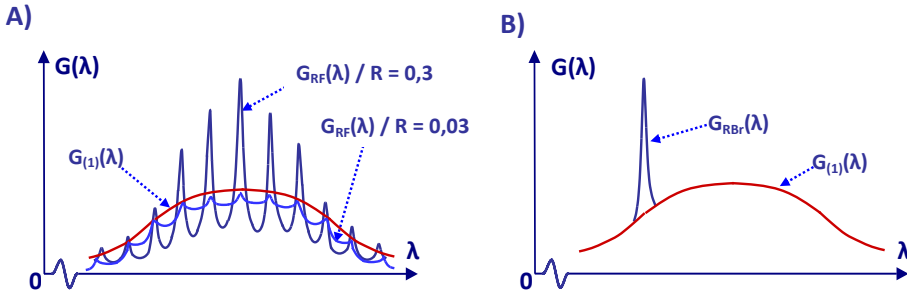
Wielokrotne odbicia promieniowania zmieniają charakter funkcji opisującej transmisję mocy. W efekcie wielokrotnych odbić sygnał wyjściowy wzrasta dla wybranych warunków fazowych. Wzmocnienie  $G_R$  wzmacniacza półprzewodnikowego z rezonatorem zapisać można zależnością (5-11):

$$G_R(f) = \frac{(1 - R_1)(1 - R_2)G_{(1)}}{(1 - \sqrt{R_1 R_2}G_{(1)})^2 + 4\sqrt{R_1 R_2}G_{(1)}\sin^2\varphi_{(1)}}; \quad (5-11)$$

W powyższym wzorze współczynniki odbicia obu zwierciadeł oznaczono – zgodnie z rys. 5.5B – przez  $R_1$  i  $R_2$ . Te same oznaczenia użyto dla reflektorów Bragga z rys. 5.5C. Kąt  $\varphi_{(1)}$  zależy od wielkości odstrojenia częstotliwości  $f$  wzmacnianego sygnału od częstotliwości rezonansowej  $f_R$  rezonatora i czasu propagacji  $nL/c$  sygnału przez falowód ( $n$  jest współczynnikiem załamania).

$$\varphi_{(1)} = 2\pi(f - f_R)\frac{nL}{c}; \quad (5-12)$$

W granicznym przypadku, gdy  $R_1 = 0$  i  $R_2 = 0$  otrzymujemy  $G_R = G_{(1)}$ .



**Rys. 5.6.** Typowe charakterystyki wzmocnienia  $G(\lambda)$  dla wzmacniacza półprzewodnikowego z rezonatorem. A) Charakterystyki wzmocnienia  $G_{RF}$  wzmacniacza z rezonatorem Fabry'ego-Perota.  $G_{(1)}(\lambda)$  wzmocnienie dla jednorazowego przepływu sygnału. B) Wzmocnienie  $G_{RB}$  dla wzmacniacza z rezonatorem między reflektorami Bragga.

Na rys. 5.6A pokazano rodzinę charakterystyk  $G_{RF}(\lambda)$  dla wzmacniacza z rezonatorem Fabry'ego-Perota, utworzonym między zwierciadłami, dla wartości współczynników odbicia  $R_1 = R_2 = R$ . W zakresie długości fali, dla których sygnał optyczny jest wzmacniany przy przepływie aktywnym falowodem obserwuje się cały grzebień częstotliwości rezonansowych. Gdy zmniejszać wartości  $R$ , to wzmocnienie zbliża się do charakterystyki pojedynczego przepływu  $G_{(1)}(\lambda)$ .

Nieco inny przebieg ma charakterystyka wzmocnienia wzmacniacza, którego rezonator utworzono między reflektorami Bragga – rys. 5.6B. Zgodnie z oczekiwaniami w zakresie długości fali, w którym sygnał jest wzmacniany, obserwuje się pojedynczy rezonans na częstotliwości, dla której periodyczna struktura Bragga najsilniej odbija sygnał optyczny. Poza nim struktury Bragga nie zaburzają przepływu sygnału optycznego i wzmocnienie równe jest wartości  $G_{(1)}$ .

Szerokość pasma wzmocnienia dla rezonansowego wzmacniacza półprzewodnikowego zapisuje się zależnością (5-13):

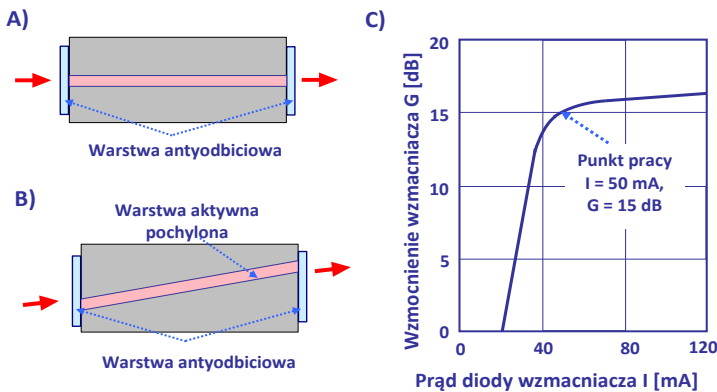
$$\Delta f_{R3dB} = \frac{c}{\pi nL} \sin^{-1} \left[ \frac{(1 - R_1)(1 - R_2)}{2G\sqrt{R_1 R_2}} \right]; \quad (5-13)$$

We wzorze tym  $G$  jest maksymalnym wzmocnieniem we wzmacniaczu z rezonatorem.

Półprzewodnikowe wzmacniacze z rezonatorem stosowane są najczęściej w sytuacjach, gdy potrzebny jest wzmacniacz selektywny o niewielkim paśmie transmisji. W stosunku do wzmacniacza z rezonatorem Fabry'ego-Perota użycie reflektorów Bragga redukuje liczbę rezonansów, jednakże komplikuje technologię wykonania. Konieczna jest wtedy stabilizacja temperatury wzmacniacza, by uniknąć efektów niepożądanych i niekontrolowanych przestrojeń.

### 5.3.2. Wzmacniacze półprzewodnikowe z falą bieżącą

Analiza wykazuje, że niewielkie odbicia na końcach obszaru aktywnego prowadzą do silnych zafalowań charakterystyki wzmocnienia wzmacniacza. Aby uzyskać równomierną szerokopasmową charakterystykę wzmocnienia, należy usunąć efekty rezonansowe. Zmniejszając odbicia zwierciadeł do zera, wzmacniacz półprzewodnikowy staje się wzmacniaczem z falą bieżącą – rys. 5.7A. Efekt wzmocnienia uzyskuje się w trakcie jednokrotnego przepływu sygnału optycznego przez obszar aktywny.



**Rys. 5.7.** Wzmacniacze półprzewodnikowe z falą bieżącą. A) Zwierciadła zamienione na warstwy antyodbiciowe. B) Warstwa aktywna pochylona w celu minimalizacji odbić. C) Zależność  $G(I)$  wzmocnienia od prądu wzmacniacza półprzewodnikowego z falą bieżącą.

Wzmocnienie  $G(f)$  zmniejsza się i – zgodnie z zależnością (5-10) – wynosi  $G_{(1)}$ . W praktycznych rozwiązaniach wzmocnienia wzmacniacza mieszczą się w przedziale 15–25 dB, natomiast znacznie poszerza się pasmo wzmacniacza, które teraz wynosi  $\Delta\lambda_{3dB} = 40\text{--}100\text{ nm}$ .

Charakterystyka  $G(f)$  wzmacniacza SOA z falą bieżącą powinna mieć w paśmie pracy minimalne zafalowania. O wymiarze zafalowań mówi zależność (5-14).

$$\Delta G = \frac{G_{\text{MAX}}}{G_{\text{MIN}}} = \left( \frac{1 + G_{(1)}\sqrt{R_1 R_2}}{1 - G_{(1)}\sqrt{R_1 R_2}} \right)^2; \quad (5-14)$$

Wynika z niej, że przy wzmocnieniu  $G = 30\text{ dB}$  ograniczenie zafalowań poniżej 3 dB wymaga uzyskania odbić sygnału optycznego poniżej 0,1%, co nie jest łatwe. W poszukiwaniu rozwiązania wykonywane są wielowarstwowe struktury bezodbiciowe. Ciekawym rozwiązaniem jest umieszczenie warstwy aktywnej pod wybranym kątem w stosunku głównego kierunku propagacji – rys. 5.7B. W takiej strukturze szczątkowe promieniowanie odbite od warstw, które ograniczają falowód aktywny, zmienia kierunek i ulega rozproszeniu.

Charakterystyki opisujące parametry półprzewodnikowego wzmacniacza z falą bieżącą przy pracy z sygnałami na dużym poziomie mocy odpowiadają pokazanym na rys. 5.3. Wzmocnienie  $G(f)$  jest oczywiście funkcją prądu płynącego przez diodę. Przykład takiej zależności prezentuje rys. 5.7C. Wzmocnienie w początkowej części charakterystyki rośnie bardzo szybko z prądem, by następnie przejść w obszar nasycenia. Wzmocnienie, w określonej strukturze i rozmiarach warstwy aktywnej, osiąga swoją wartość maksymalną, natomiast dalszy wzrost prądu nie zwiększa wzmocnienia, ale zwiększa moc nasycenia. Punkt pracy dobiera się zwykle w obszarze zakrzywienia.

Wzmacniacz półprzewodnikowy jest w niewielkim stopniu czuły na polaryzację sygnału optycznego. Pomiar wykazują różnicę wzmocnienia na poziomie 1 dB.

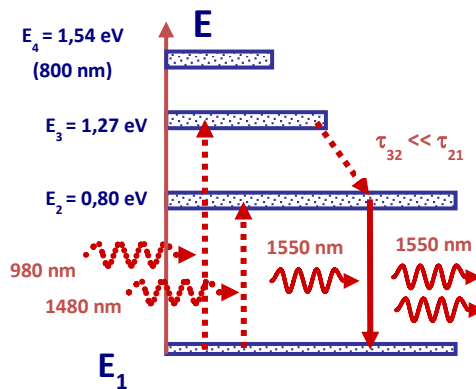
Wadą wzmacniaczy półprzewodnikowych jest znaczny ubytek wzmocnienia ze względu na straty połączenia ze światłowodami, który może przekraczać 10 dB. Z tego też względu produkowane są zintegrowane układy laser–wzmacniacz jako jedna struktura.

## 5.4. Wzmacniacze światłowodowe EDFA

### 5.4.1. Światłowód domieszkowany erbem

Wzmacniacz EDFA ze światłowodem domieszkowanym erbem odgrywa znaczącą rolę w telekomunikacji światłowodowej. Wprowadzenie domieszki w postaci jonów  $\text{Er}^{3+}$  do rdzenia jednomodowego światłowodu kwarcowego istotnie zmienia charakterystykę jego tłumienia. Pojawiają się „piki” tłumienia dla długości fal: 514 nm, 650 nm, 800 nm, 980 nm i 1480-1550 nm. Oznacza to, że jony erbu, absorbując moc sygnału optycznego, zostają pobudzone. Każdy z „pików” krzywej absorpcji odpowiada jednemu przejściu energetycznemu.

Użytecznym z punktu widzenia procesu wzmacniania okazał się układ trzypoziomowy z poziomami energetycznymi  $E_1$ ,  $E_2$  i  $E_3$ , pokazany na rys. 5.8. W warunkach temperatury pokojowej najliczniej obsadzony jest poziom  $E_1$ . Inwersję obsadzeń między poziomami  $E_2$  i  $E_1$  uzyskuje się przy pompowaniu sygnałem o  $\lambda = 980$  nm lub 1480 nm. Przy pompowaniu sygnałem 980 nm poziom  $E_2$  osiągnięty jest w dwóch krokach. Najpierw jon zostaje pobudzony do poziomu  $E_3$ , z którego w krótkim czasie  $\tau_{32}$  przechodzi do poziomu  $E_2$ . Czas  $\tau_{21}$  przebywania na poziomie  $E_2$  jest znacznie dłuższy od  $\tau_{32}$ . Dzięki temu tworzy się inwersja obsadzeń. Doprowadzenie do światłowodu i propagacja sygnału o długości fali 1550 nm, odpowiadającej różnicy energii ( $E_2 - E_1$ ), uruchamia proces emisji wymuszonej i sygnał zostaje wzmacniony.



**Rys. 5.8.** Poziomy energetyczne jonów erbu w światłowodzie kwarcowym, biorące udział w akcji wzmacniania sygnału optycznego. Powrót z poziomu  $E_2$  do poziomu  $E_1$  jest wykorzystany w procesie emisji wymuszonej.

Przy pompowaniu sygnałem 1480 nm poziom  $E_2$  osiągnięty jest w jednym kroku i jest to rozwiązanie praktyczne. Domieszka w postaci jonów  $\text{Er}^{3+}$  powoduje wzrost tłumienia światłowodu z 0,2 dB/km do 1500 dB/km dla 1480 nm.

Badania ustaliły poziom domieszkowania na około 500 atomów erbu na milion cząstek kwarcu. Aby poszerzyć różnice poziomów energii ( $E_2 - E_1$ ), do materiału rdzenia dodawane są dodatkowe jony, jak  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Ge}_2\text{O}_3$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ . Dodatkowe domieszkowanie rdzenia światłowodu powoduje niewielkie przesunięcia charakterystyki wzmacnienia i w rezultacie poszerzenie pasma wzmacnienia.

### 5.4.2. Układ i charakterystyki wzmacniacza EDFA

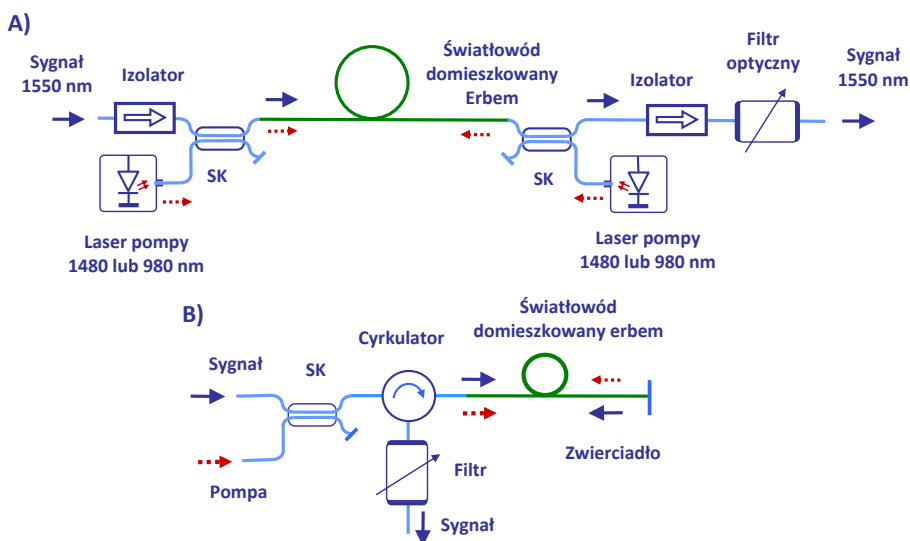
Schematy ideowe układów wzmacniaczy pokazano na rys. 5.9. W układzie wzmacniacza z rys. 5.9A światłowód domieszkowany erbem, zwykle o długości 10–30 metrów, wprowa-

dzony jest do toru transmisyjnego. Sygnały z pomp, którymi zwykle są lasery półprzewodnikowe stosunkowo dużej mocy, wprowadzane są z obu stron do odcinka aktywnego z pomocą sprzęgaczy.

W przypadku użycia jednej pompy jej sygnał kierowany jest zwykle w kierunku przeciwnym do kierunku transmisji wzmacnianego sygnału. Aby sygnał pomp nie był propagowany na zewnątrz wzmacniacza, w układzie wprowadzono izolatory i ewentualnie filtr optyczny. Filtr optyczny wyjściowy usuwa szczątkowy sygnał pompy, zmniejsza poziom szumów emisji spontanicznej.

W układzie wzmacniacza pokazanym na rys. 5.9B użyto jednej pompy i dwukrotnie krótszego odcinka aktywnego światłowodu. Na końcu tego odcinka umieszczono zwierciadło zawracające sygnał pompy i sygnał wzmacniany. Aby skierować sygnał wzmacniany do portu wyjściowego, zastosowano cyrkulator. Zmiana konfiguracji układu umożliwiła jego uproszczenie.

Opublikowano dużą liczbę ciekawych rozwiązań układów wzmacniaczy EDFA. Często wzmacniacze EDFA współpracują z obwodami kompensacji dyspersji.

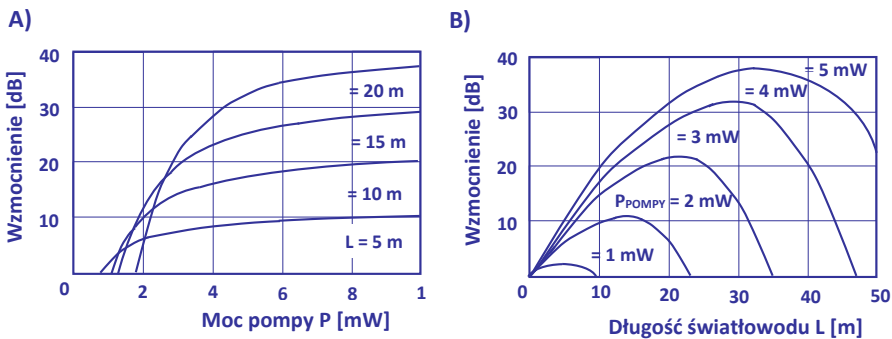


**Rys. 5.9.** Układy wzmacniaczy EDFA ze światłowodem domieszkowanym erbem (zaznaczony kolorem zielonym). A) Układ z dwoma laserami pompującymi doprowadzającymi sygnał przez sprzęgacze SK. Izolatory i filtr optyczny izolują tor zewnętrzny od sygnałów pomp. B) Odmiana układu wzmacniacza z cyrkulatorem i światłowodem, w którym sygnał transmitowany jest w dwie strony.

Charakterystyki wzmacniaczy EDFA zależą od szeregu wielkości. Punktem wyjścia są parametry materiału, z którego wykonano rdzeń światłowodu. Jednym z decydujących wielkości jest oczywiście długość domieszkowanego światłowodu. Równie istotne są parametry sygnału pompującego, jego długość fali, moc i warunki absorpcji przez światłowód. Programy

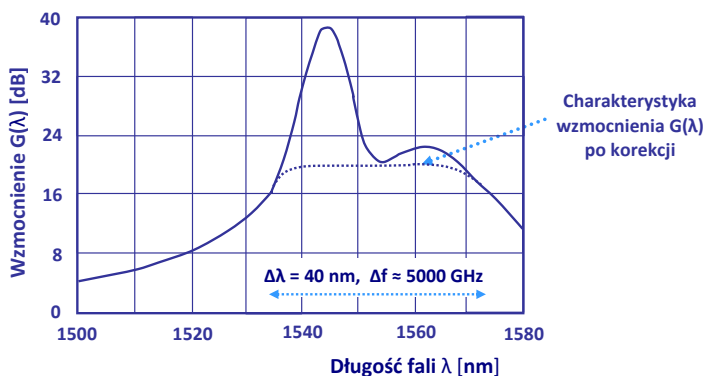
pozwalające obliczyć parametry wzmacniacza EDFA przyjmują różne uproszczenia i tym samym różne dokładności. Najważniejszym parametrem wzmacniacza jest jego wzmocnienie i warunki, przy których można je osiągnąć. Na rys. 5.10 pokazano dwie rodziny obliczonych charakterystyk, pokazujące związki między długością światłowodu o wybranych parametrach, mocą pompy i wzmocnieniem.

Charakterystyki przedstawione na rys. 5.10B wskazują, że dla określonej mocy lasera pompującego istnieje optymalna długość światłowodu, dla której wzmocnienie jest maksymalne. Wzrost mocy pompy i wzrost długości światłowodu prowadzą do zwiększenia wzmocnienia. W zależności od przeznaczenia – wzmacniacz mocy lub wzmacniacz niskoszumny – optymalizuje się moc pompy i długość światłowodu. We wzmacniaczu mocy istotna jest duża wartość mocy nasycenia. Moc nasycenia i wzmocnienie rosną z mocą pompy. Jednoczesna transmisja różnych długości fali (co ma miejsce przy multipleksacji WDM) nakazuje ostrożne dobieranie poziomów mocy kanałów w stosunku do mocy nasycenia, aby uniknąć przesłuchów. W praktycznych rozwiązaniach moc pompy wynosi kilkadziesiąt mW. W publikacjach opisano eksperyment z mocą pompy powyżej 1 W i mocą nasycenia powyżej 200 mW.



**Rys. 5.10.** Charakterystyki małosygnałowego wzmocnienia wzmacniacza EDFA w zależności od poziomu mocy pompy dla różnych długości światłowodu (obliczenia symulowane). A) Rodzina charakterystyk zależności wzmocnienia od długości światłowodu i mocy pompy. B) Optymalne długości światłowodu dla różnych mocy pomp.

We wzmacniaczu niskoszumnym, który współpracuje z fotodetekтором, istotnym parametrem – poza wzmocnieniem – jest niski poziom szumów. Wzmocnienie wzmacniacza rośnie z długością światłowodu, ale od pewnej długości rosną szybko szумы. Mniejsze szумы uzyskuje się, gdy kierunki propagacji sygnałów wzmacnianego i pompy są takie same.



**Rys. 5.11.** Typowa charakterystyka wzmocnienia wzmacniacza EDFA. Na rysunku pokazano możliwość korekty kształtu charakterystyki.

W niektórych praktycznych rozwiązaniach zmniejsza się średnicę rdzenia domieszkowanego erbem do 2,5 mikrometra. Pozwala to zmniejszyć moc pompy. Jednakże problemem staje się wprowadzenie sygnału optycznego do rdzenia, rosną w tym przypadku straty odbicia.

Jak opisano w rozdziale 3, wzmacniacz EDFA może pracować w układzie lasera. Wymaga to połączenia wejścia z wyjściem wzmacniacza EDFA. Lepszym i często spotykanym rozwiązaniem jest budowa dwóch zwierciadeł z siatką Bragga i utworzenie rezonatora. Powstaje tą drogą laser o dużej czystości sygnału.

Na rys. 3.18B pokazano ideę wykorzystania światłowodu dwurdzeniowego. Rdzeń wewnętrzny, centralny, jest jednomodową prowadnicą wzmocnianego sygnału optycznego. Otaczający go rdzeń zewnętrzny jest prowadnicą wielomodową, pobudzoną sygnałem pompy, który to sygnał z kolei pobudza jony domieszek rdzenia wewnętrznego. Takie rozwiązanie ułatwia wykorzystanie całej mocy pompy i podnosi moc nasycenia wzmacniacza. Dwurdzeniowy światłowód jest wykorzystany tylko we wzmacniaczu. Poza nim sygnał optyczny wraca do typowego światłowodu jednomodowego.

### 5.4.3. Wzmacniacze z innymi pierwiastkami ziem rzadkich

Doskonałe – z punktu widzenia pracy łączy światłowodowych – parametry wzmacniaczy EDFA ze światłowodem kwarcowym domieszkowanym erbem skłoniły do badania światłowodów z innymi metalami ziem rzadkich. W szczególności jednym z celów było skonstruowanie wzmacniacza w paśmie 1200–1400 nm, w którym wzmacniacze EDFA nie pracują. Jednym ze znalezionych rozwiązań było użycie światłowodu z rdzeniem domieszkowanym jonami prazeodymu  $\text{Pr}^{3+}$ . Tak powstały wzmacniacze światłowodowe PDFA (ang. *Praseodymium-Doped Fiber Amplifier*). We wzmacniaczach PDFA pompy pracują na długości fali 1017 nm, z mocą dochodzącą do 300 mW. Wzmocnienie dochodzące do 30 dB uzyskuje

się w paśmie 1280–1340 nm. Zaletą jest duża moc nasycenia wzmacniacza, dochodząca do 100 mW. Technologiczną trudnością wykonania wzmacniacza PDFA jest konieczność użycia światłowodu, którego rdzeń wykonywany jest na bazie fluorku. Osiągane parametry są wtedy lepsze, niż gdy domieszkowany światłowód ma rdzeń kwarcowy.

Kolejnym ciekawym i użytecznym rozwiązaniem jest budowa wzmacniacza światłowodowego TDFA, wykorzystującego światłowód kwarcowy z rdzeniem domieszkowanym tujem (ang. *Thulium-Doped Fiber Amplifier*). Wzmocnienie uzyskuje się w paśmie 1480–1510 nm, przy wzmocnieniu przewyższającym 20 dB. Praca wzmacniacza wymaga użycia dwóch pomp jednocześnie o długościach fal 1480 i 1510 nm. Odpowiednie dobranie długości fal pomp umożliwia także uzyskanie wzmocnienia w paśmie 1,7–2,1  $\mu\text{m}$ . Z punktu widzenia zastosowania w telekomunikacji znaczenie tego pasma jest obecnie niewielkie.

Kolejny wzmacniacz światłowodowy NdDFA (ang. *Neodymium-Doped Fiber Amplifier*) wykorzystuje światłowód z rdzeniem domieszkowanym neodymem. Wzmacniacze NdDFA pracują typowo w okolicach 1345 nm. Przez użycie rozmaitych dodatkowych zabiegów pasmo wzmocnienia można przesunąć i poszerzać w zakresie 1260–1360 nm.

Bardzo interesującym rozwiązaniem okazało się dodanie do rdzenia światłowodu kwarcowego, obok domieszki jonami erbu, kolejnej domieszki jonami iterbu EYDFA. W najlepszych rozwiązaniach liczba jonów iterbu jest kilkakrotnie większa od liczby jonów erbu. Wzmacniacze EYDFA wykorzystujące taki światłowód pompowane są promieniowaniem o długości fali 980 nm. Jony iterbu silniej niż erbu absorbują promieniowanie pompy. Energia pobudzonych jonów iterbu jest transferowana do jonów erbu, które zostają tą drogą pobudzone do poziomu umożliwiającego proces wzmocnienia w paśmie 1500 nm. Silniejsza absorpcja promieniowania pompy pozwala istotnie skrócić długość światłowodu wzmacniacza EYDFA.

Nad problemem wzmocnienia sygnałów optycznych w pasmach transmisji światłowodowej pracują zespoły badawcze wielu laboratoriów. Aby poszerzyć pasmo wzmocnienia, łączone są ze sobą różne typy wzmacniaczy. Tworzone są także układy łańcuchowe, które łączą duże wzmocnienie z dużym poziomem mocy wyjściowej.

## 5.5. Światłowodowe wzmacniacze Ramana

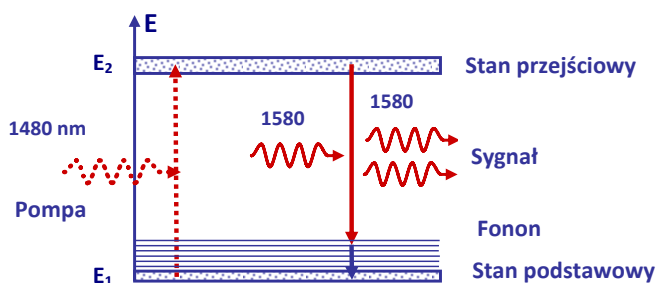
### 5.5.1. Efekt wymuszonego rozpraszania Ramana

Spontaniczne rozpraszanie Ramana jest efektem oddziaływania promieniowania optycznego z materiałem (molekułami) ośrodka, którym to promieniowanie się porusza. Odkrył i opisał je Chandrasekhara Venkata Raman, który w roku 1930 otrzymał za to nagrodę Nobla. Proces oddziaływania jest złożony, ale w wielkim skrócie można go przedstawić jako oddziaływanie silnego pola EM promieniowania optycznego z zewnętrznymi elektronami molekuł. Pobudzone absorpcją promieniowania reemitują kwant promieniowania,



ale o większej długości fali i mniejszej energii. Różnica energii zostaje przekazana sieci molekuł w postaci drgań. W mechanice kwantowej wprowadzono pojęcie fononu na opisanie tych drgań i wibracji. Rezultatem oddziaływania pola EM promieniowania optycznego z siatką molekuł jest pojawienie się w widmie nowych prążków. Ten o niższej energii nazywany jest linią Stokesa, ten o wyższej energii, znacznie słabszy, to anty-linia Stokesa.

Aby opisane oddziaływanie mogło mieć miejsce, natężenie pola EM promieniowania optycznego musi być bardzo duże. Dlatego rozpraszanie Ramana zaliczane jest do efektów nieliniowych. W jednomodowym światłowodzie kwarcowym o średnicy rdzenia kilku mikrometrów ma miejsce silna koncentracja pola EM i rozpraszanie Ramana może mieć miejsce, jeżeli doprowadzimy do światłowodu odpowiednio dużą moc.



Rys. 5.12. Poziomy energetyczny światłowodu kwarcowego – efekt wymuszonego rozpraszania Ramana.

Rozpraszanie Ramana może być wymuszone SRS (ang. *Stimulated Raman Scattering*) przez słaby sygnał optyczny o właściwie dobranej częstotliwości, propagowany wspólnie z silnym sygnałem pełniącym rolę pompy. Słaby sygnał zostaje wtedy wzmocniony kosztem sygnału pompy. Sytuację taką ilustruje rys. 5.12. Energia fotonu pompy zostaje przetworzona w mniejszą energię fotonu sygnału, a różnica energii odpowiada energii fononu pobudzającego sieć molekuł do drgań.

Efekt wymuszonego rozpraszania Ramana został wykorzystany do budowy wzmacniaczy transmitowanych optycznych sygnałów.

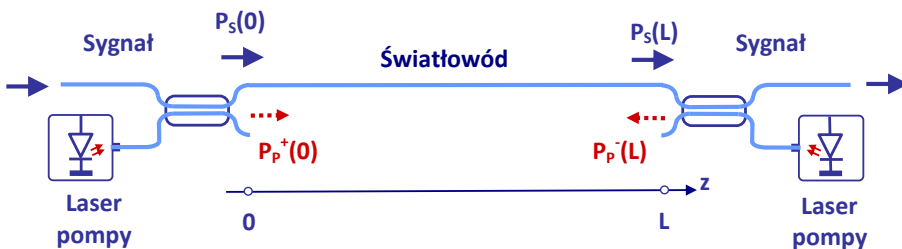
### 5.5.2. Układ wzmacniacza Ramana

Światłowodowy wzmacniacz Ramana, nazywany często rozłożonym wzmacniaczem Ramana DRA (ang. *Distributed Raman Amplifier*) ma kilka ważnych właściwości, które należy mieć na uwadze:

- charakterystyka częstotliwościowa wzmacniania ma określony kształt, a wartość wzmocnienia zależy od przesunięcia częstotliwości sygnału i pompy. Sam wzmacniacz jest szerokopasmowy,

- wzmocnienie wzmacniacza Ramana nie zależy od kierunku propagacji sygnałów: pompy i wzmacnianego, oba sygnały mogą być propagowane w tym samym kierunku albo w przeciwnych kierunkach,
- rozpraszanie Ramana jest procesem szybkim, zachodzącym krócej niż pikosekundę,
- wzmocnienie Ramana zależy od polaryzacji i jest najsilniejsze, gdy pola pompy i sygnału mają tę samą polaryzację.

Schemat układu wzmacniacza Ramana pokazano na rys. 5.13. Do światłowodu, w którym propagowany jest wzdłuż osi z sygnał o mocy  $P_S(0)$ , wprowadzono moc  $P_P^+(0)$  pompy optycznej w kierunku z, oraz w odległości  $L$  od tego miejsca moc  $P_P^-(L)$  propagowaną w kierunku przeciwnym. Takie rozwiązanie jest często stosowane.



**Rys. 5.13.** Schemat układu wzmacniacza Ramana, którego światłowód zasilany jest przez dwie pompy optyczne dostarczające sygnały w przeciwnych kierunkach.

Aby opisać zależność wzmocnienia wzmacniacza Ramana, należy wyjść z podstawowych równań wiążących moc sygnału  $P_S$  i pompy  $P_P$  z parametrami układu. Równania napisano przy upraszczającym założeniu, że sygnał wzmacniany  $P_S$  oraz sygnał pompy poruszają się w tym samym kierunku.

$$\frac{dP_S}{dz} = P_S \left( -\alpha_S + \frac{g_R}{A_{\text{eff}}} P_P \right); \quad (5-15a)$$

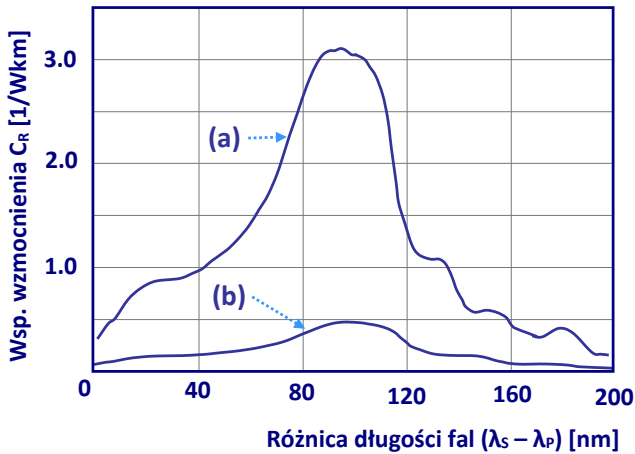
$$\frac{dP_P}{dz} = P_P \left( -\alpha_P - \frac{g_R}{A_{\text{eff}}} \frac{f_P}{f_S} P_S \right); \quad (5-15b)$$

Pierwsze z równań (5-15a) opisuje transmisję sygnału o mocy  $P_S$ . Sygnał  $P_S$  jest tłumiony, a jego tłumienie określa współczynnik tłumienia  $\alpha_S$ . Ale jednocześnie sygnał ten jest wzmacniany, a proces wzmacniania reprezentuje drugi składnik tego równania. Drugi ze składników jest skutkiem wymuszonego rozpraszania Ramana. Jego wartość jest proporcjonalna do mocy pompy  $P_P$ . Przy odpowiednio dużym poziomie mocy pompy transmitowany sygnał zostaje wzmocniony. Drugie z równań opisuje transmisję sygnału pompy o mocy  $P_P$ . Sygnał ten w trakcie transmisji jest także tłumiony, o czym mówi współczynnik tłumienia  $\alpha_P$ . Jeśli wystąpi wymuszone rozpraszanie Ramana, to tłumienie sygnału pompy wzrośnie (!), ponieważ zwiększy go obecność drugiego składnika.

W równaniach występuje współczynnik wzmocnienia Ramana  $g_R(\lambda_S, \lambda_P)$ , zależny od różnicy częstotliwości wzmacnianego sygnału i pompy. Ponieważ rozpraszanie Ramana jest efektem występującym przy dużych natężeniach pola elektromagnetycznego, to bardzo ważnym parametrem jest efektywna powierzchnia  $A_{\text{eff}}$  strumienia sygnału optycznego. Stosunek  $g_R/A_{\text{eff}} = C_R$  nazywany jest współczynnikiem sprawności wzmacniania Ramana. Jego wartość jest w praktyce mierzona, gdyż zależy nie tylko od różnicy długości fali ( $\lambda_S - \lambda_P$ ), ale też od średnicy rdzenia światłowodu.

Na rys. 5.14 pokazano przykład orientacyjnego przebiegu współczynnika  $C_R(\lambda_S - \lambda_P)$  dla wybranego światłowodu o efektywnym przekroju  $A_{\text{eff}} = 25 \mu\text{m}^2$  – krzywa (a) i dla typowego światłowodu z rdzeniem o średnicy  $10 \mu\text{m}$  – krzywa (b). Pięciokrotne zwiększenie przekroju rdzenia skutkuje kilkukrotnym zmniejszeniem wartości tego współczynnika.

Największe wzmocnienie uzyskiwane jest gdy przesunięcie długości fali wynosi około 100–110 nm, co odpowiada przesunięciu o około 13 THz. Pasma dobrego wzmocnienia jest bardzo szerokie i wynosi około 4–6 THz. Można je przesuwac, zmieniając długość fali pompy.



**Rys. 5.14.** Zmierzone przebiegi współczynników sprawności  $C_R$  wzmocnienia Ramana dla: (a) światłowodu o przekroju efektywnym  $A_{\text{eff}} = 25 \mu\text{m}^2$  (przebieg przybliżony), (b) dla typowego światłowodu o średnicy rdzenia  $10 \mu\text{m}$ .

W dalszych rozważaniach przyjęty zostanie warunek pracy małymi sygnałami. Równanie (5-15b) upraszcza się, moc pompy  $P_P(z)$  maleje w wyniku naturalnego tłumienia:

$$P_P(z) = P_P(0)\exp[-\alpha_P z]; \quad (5-16)$$

Można teraz zapisać zależność na moc sygnału  $P_S(L)$  po transmisji przez światłowód, w którym jest wzmacniany:

$$P_S(L) = P_S(0)\exp[C_R P_P(0)L_{\text{eff}} - \alpha_S L]; \quad (5-17)$$

gdzie  $L_{\text{eff}} < L$  jest efektywną długością światłowodu wzmacniacza, wyrażoną zależnością (5-18):

$$L_{\text{eff}} = \frac{1 - \exp(-\alpha_P L)}{\alpha_P}; \quad (5-18)$$

Zależność (5-19) opisuje przejrzyste wzmocnienie  $G_R$  wzmacniacza Ramana jako stosunek mocy sygnału  $P_S(L)$  na końcu odcinka wzmacniającego do mocy sygnału  $P_S(0)$  w porcie wejścia.

$$G_R = \frac{P_S(L)}{P_S(0)} = \exp[C_R(f_S, f_P)P_P(0)L_{\text{eff}} - \alpha_S L]; \quad (5-19)$$

Zależność powyższa wskazuje na rolę pompy w „odtłumieniu” światłowodu. W praktycznych rozwiązaniach pompy oddalone są od siebie o kilkanaście, a nawet kilkadziesiąt kilometrów. Uzyskiwane wzmocnienia mieszczą się w granicach 8–20 dB.

Moce pomp dochodzą do kilku watów, natomiast moce sygnałów są zwykle o 30 dB mniejsze. Aby poszerzyć pasmo wzmocnienia, stosowane są systemy z wieloma pompami. Dobierając liczbę pomp, ich moce oraz długości fali, na których pracują, można kształtować charakterystykę wzmocnienia wzmacniacza.

**Tabela 5.1.** Porównanie wzmacniaczy światłowodowych EDFA domieszkowanych erbem ze wzmacniaczami DRA Ramana

Parametr	EDFA	DRA
<b>Pasmo wzmocnienia</b>	Zależy od domieszek	Zależy od wybranych długości fali pomp
<b>Szerokość pasma wzmocnienia</b>	20 nm, więcej dla specjalnie dobranych domieszek	48 nm, więcej dla większej liczby pomp
<b>Wzmocnienie</b>	20 dB lub więcej, zależnie od długości światłowodu i mocy pomp	4–11 dB, proporcjonalnie do mocy pomp i efektywnej długości światłowodu
<b>Moc nasycenia</b>	Zależy od wzmocnienia i materiału	Może być porównywalna z mocą pomp
<b>Długość fali pomp</b>	980 nm lub 1480 nm dla EDFAs	100 nm poniżej wzmacnianego sygnału

Wzmacniacze Ramana są topologicznie prostsze, ponieważ istniejący transmisyjny światłowod może być użyty jako medium wzmacniające po właściwym wprowadzeniu pomp optycznych. Jednakże dobór pomp, ich sposób włączenia, dobrane długości fal mają decydujący wpływ na charakterystykę wzmocnienia i właściwości szumowe wzmacniacza. Należy dodać, że opracowano konstrukcje, w których użyto dwie pompy o różnych długościach fal. W przypadku użycia dwóch pomp efekty ich działania sumują się. Okazało się, że jest to droga do kształtowania charakterystyki wzmocnienia w szerokim paśmie pracy.

W tabeli 5.1 zestawiono obok siebie podstawowe dane i parametry dwóch typów wzmacniaczy światłowodowych.

Oddzielnym problemem konstruktorów wzmacniaczy jest wprowadzenie sygnału pompy zgodnie lub też przeciwnie do kierunku transmisji sygnału wzmacnianego. Pompowanie wsteczne do kierunku transmisji wzmacnianego sygnału ma kilka istotnych korzyści, z których najważniejszą jest poprawa właściwości szumowych wzmacniacza.

## 5.6. Podsumowanie

Wzmacniacze optyczne odgrywają wielką rolę w strukturach współczesnych transmisyjnych sieci światłowodowych. Wzmacniacze wprowadzane do sieci transmisyjnej pełnią trzy różne funkcje, pracując jako:

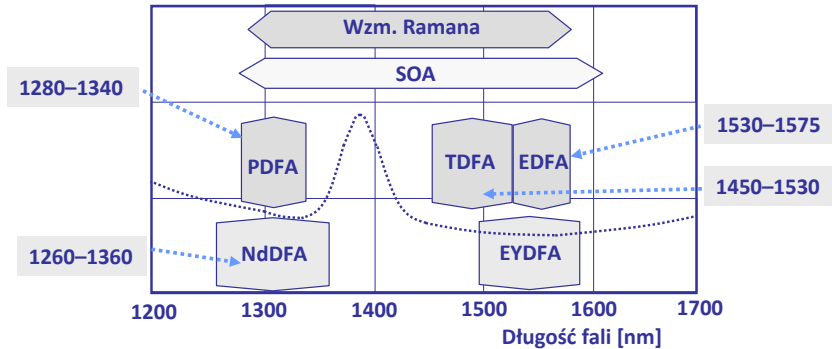
- wzmacniacze mocy w strukturach nadajników optycznych, zwykle jako ostatni element układu scalonego;
- wzmacniacze liniowe, często jako szerokopasmowe układy kombinowane, w połączeniach łańcuchowych, kompensujące tłumienie światłowodu;
- małosygnałowe i niskoszumne wzmacniacze zwiększające czułość odbiorników optycznych.

Współcześnie budowane wzmacniacze optyczne mogą pracować praktycznie w całym paśmie pracy światłowodu. Na rys. 5.15 pokazano zakresy zastosowań wzmacniaczy opisanych w tym rozdziale. Należy mieć na uwadze, że nowe konstrukcje i typy wzmacniaczy, nie pokazane na wykresie, ciągle poszerzają częstotliwościowe zakresy wzmacniania, powiększają poziomy mocy, przy których zniekształcenia nieliniowe można zaniedbać.

Istotnym problemem każdego typu wzmacniaczy, niezależnie od pasma wzmacnianych sygnałów, jest poziom szumów wprowadzanych przez wzmacniacz mierzony wartością jego współczynnika szumów. Należy oczekiwać, że konstruktorzy wzmacniaczy odnotują w najbliższych latach istotny postęp.

Podsumowując rozważania tego rozdziału, należy dodać, że prowadzone badania i rozwój idą w trzech najważniejszych kierunkach.

- Rozwój wzmacniaczy półprzewodnikowych SOA, wykonywanych na tych samych podłożach co lasery i fotodetektory. Wzmacniacze tego typu umożliwiają wykonanie zintegrowanych układów odbiorników i nadajników.
- Rozwój wzmacniaczy światłowodowych wykorzystujących rdzenie domieszkowane metalami ziem rzadkich. Badane są rozmaite kombinacje domieszek rdzenia, kombinacje częstotliwości pomp, światłowody dwurdzeniowe. Należy oczekiwać istotnych postępów i poprawy parametrów pracy.
- Dalszy rozwój wzmacniaczy rozłożonych Ramana DRA, które stanowią bardzo interesujące rozwiązania problemu tłumienia. Wzmacniacze DRA nadają się szczególnie do systemów stosujących multipleksację DWDM.



**Rys. 5.15.** Porównanie pasm pracy wzmacniaczy optycznych wymienionych w tym rozdziale. EDFA – wzmacniacz ze światłowodem domieszkowanym jonami erbu  $Er^{3+}$ , PDFa – wzmacniacz ze światłowodem domieszkowanym jonami prazeodymu  $Pr^{3+}$ , NdDFA – wzmacniacz ze światłowodem domieszkowanym jonami neodymu Nd, TDMA – wzmacniacze ze światłowodem domieszkowanym jonami tulu T, EYDFA – wzmacniacz ze światłowodem domieszkowanym jonami erbu i jonami iterbu, SOA – optyczny wzmacniacz półprzewodnikowy.

Rola wzmacniaczy optycznych jest ogromna, ich zastosowanie jest ważnym krokiem na drodze do całkowitego zastąpienia w łączach optycznych układów elektronicznych optycznymi.

## Bibliografia rozdziału 5

- 5.1 W.J. Miniscalco, "Erbium-Doped Glasses for Fiber Amplifiers at 1500 nm", *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 9, No. 2, 1991.
- 5.2 P.C. Beker, N.A. Olsson, J.R. Simpson, *Erbium-Doped Fiber Amplifiers, Fundamentals and Technology*, Academic Press, 1999.
- 5.3 M.J. Connelly, "Wideband Semiconductor Optical Amplifier Steady-State Numerical Model", *IEEE Journal of Quantum Electronics*, Vol. 37, No. 3, 2001.
- 5.4 S. Tanabe, "Rare-earth-doped glasses for fiber amplifiers in broadband telecommunication", *Photonics Based on Wavelength Integration and Manipulation*, Vol. 2, 2005.
- 5.5 X.Z. Zhang et al., "Er<sup>3+</sup>-Yb<sup>3+</sup> co-doped glass waveguide amplifiers using ion-exchange and field assisted nnealing", *Optics Communications*, December, 2006.
- 5.6 B. Ziętek, *Optoelektronika*, Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu Mikołaja Kopernika, 2005.
- 5.7 B. Ziętek, *Materiały do wykładów*, <https://www.fizyka.umk.pl/~bezet/>.
- 5.8 F. Prudenzano et al., "Optimization and Characterization of Rare-Earth-Doped Photonic-Crystal-Fiber Amplifier Using Genetic Algorithm", *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 25, No. 8, 2007.
- 5.8 Y. Said, H. Rezig, A. Bouallegue, "Analysis of Noise Effects in Long Semiconductor Optical Amplifiers", *The Open Optics Journal*, No. 2, 2008.
- 5.9 Y. Feng, L. Taylor, D.B. Calia, "Multiwatts narrow linewidth fiber Raman amplifiers", *Optics Express* 10927, Vol. 16, No. 15, 2008.
- 5.10 P.M. Jaff, "Characteristic of Discrete Raman Amplifier at Different Pump Configurations", *World Academy of Science, Engineering and Technology*, Vol. 54, 2009.

- 5.11 G.V. Prakash, S.S. Babu, A.A. Reddy, "Optical Amplifiers from Rare-Earth Co-Doped Glass Waveguides", *Advances in Optical Amplifiers*, 2010.
- 5.12 M.M. Jardim Martini, "Gain Profile Optimization for Raman+EDFA Hybrid Amplifiers with Recycled Pumps for WDM Systems", *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, Vol. 9, No. 2, 2010.
- 5.13 A.W. Naji, Cheng Xiau Sanet, "Review of Erbium-doped fiber amplifier", *International Journal of the Physical Sciences*, Vol. 6, No. 20, 2011.
- 5.14 B. Dussardier, W. Blanc, "Novel Dopants for Silica-Based Fiber Amplifiers", 2011, <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00589258>.
- 5.15 P. Urquhart et al., *Advances in Optical Amplifiers*, InTechOpen, 2011. <http://www.intechopen.com/books/advances-in-optical-amplifiers>.
- 5.16 D. Dorosz et al., "Active optical fibres for application in laser and broadband ASE sources", *Bulletin of the Polish Academy of Sciences, Technical Sciences*, Vol. 60, No. 4, 2012.
- 5.17 I. Kaur, N. Gupta, *Hybrid Fiber Amplifier*, w: *Optical Communications Systems*, N. Das (ed.), InTech, 2012, <http://www.intechopen.com/books/optical-communications-systems/hybrid-fiber-amplifiers>.
- 5.18 A. Rani, S. Dewra, "Semiconductor optical amplifiers in optical Communication system-Review", *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, Vol. 2, Iss. 10, 2013.
- 5.19 H. Kalaycioglu et al., "Burst-mode Yb-doped fiber amplifier system optimized for low-repetition-rate operation", *Journal of the Optical Society of America*, Vol. 32, No. 5, 2015.
- 5.20 H. Schmeckeber, *Quantum-Dot-Based Semiconductor Optical Amplifiers for O-Band Optical Communication*, Springer, 2017, <http://www.springer.com/978-3-319-44274-7>.