

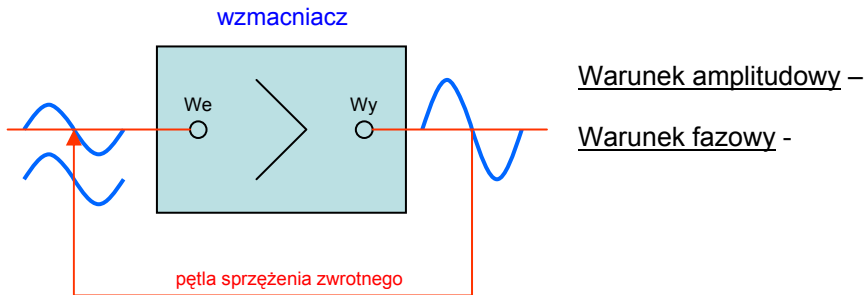
I. PODSTAWY FIZYCZNE DZIAŁANIA LASERA

L A S E R

Light **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation

Generator klasyczny

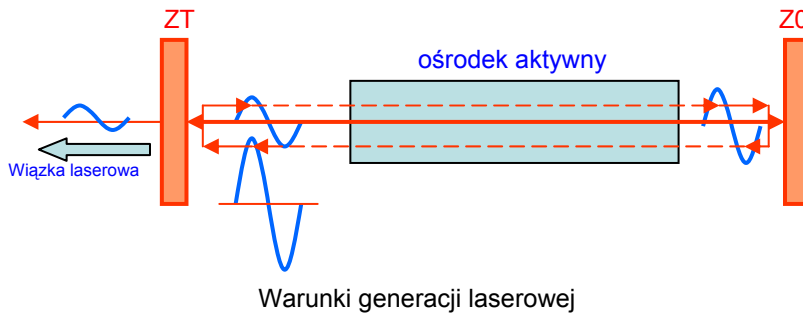
wzmacniacz + pętla sprzężenia zwrotnego



L A S E R – generator kwantowy

wzmacniacz – pobudzony ośrodek aktywny (emisja wymuszona)

sprężenie zwrotne – rezonator optyczny Fabry-Perot'a

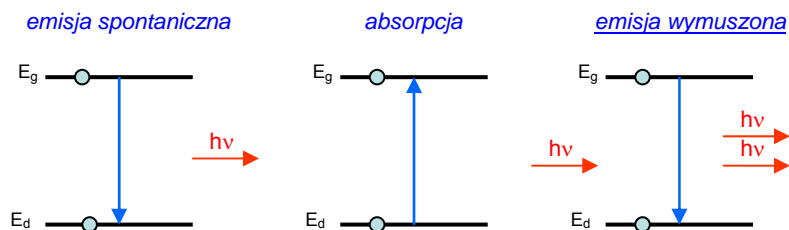


Amplitudowy –

Fazowy -

Wzmacniacz kwantowy

(emisja wymuszona)



Cechy emisji wymuszonej:

-
-
-

Inwersja obsadzeń (warunek konieczny uzyskania wzmacnienia)

Inwersja obsadzeń – odwrócenie naturalnego porządku jaki rządzi obsadzeniem poziomów energetycznych (prawo Boltzmana)

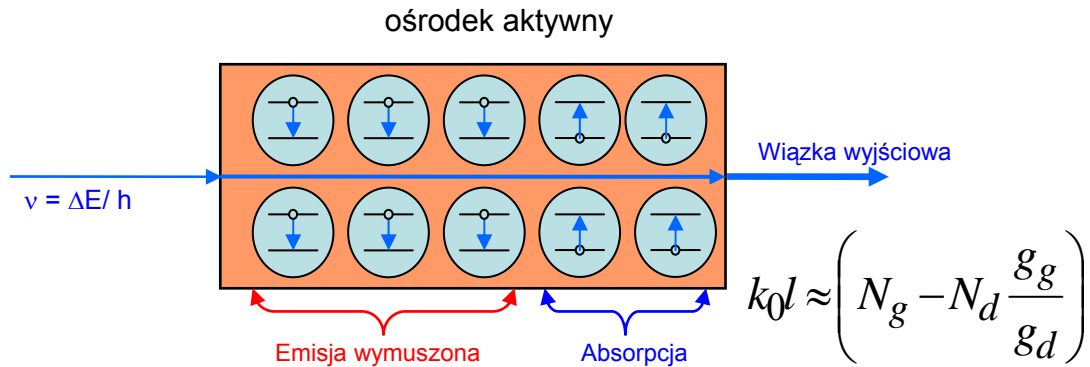
W warunkach równowagi termodynamicznej:

$$\frac{N_g}{N_d} = \exp\left(-\frac{E_g - E_d}{kT}\right) = \exp\left(-\frac{h\nu}{kT}\right)$$

Wnioski:

-
-

Inwersja obsadzeń, a wzmacnienie pobudzonego ośrodka



w warunkach:

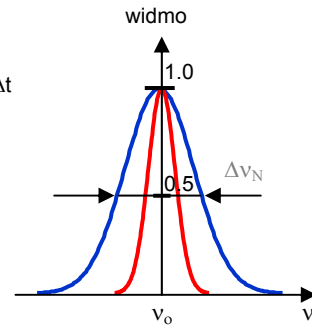
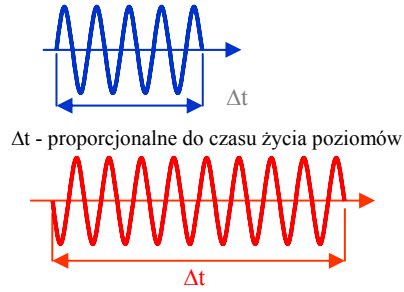
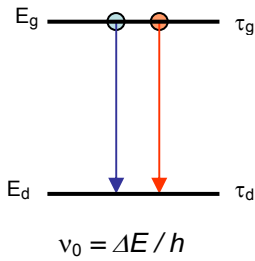
- inwersji obsadzeń ($N_g > N_d$) –
- rozkładu Boltzmana ($N_g < N_d$) –

Szerokość i kształt linii widmowych

Szerokość naturalna linii $\Delta\nu_N$

- nieruchomy, odizolowany atom
- dyskretne poziomy energetyczne

akt emisji spontanicznej -
generacja krótkiego ciągu falowego Δt



$$\Delta \nu_N = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{1}{t_g} + \frac{1}{t_d} \right)$$

Wnioski

-
-

Kształt linii widmowej
(funkcja Lorentza)

$$f_L(\nu) = \frac{\Delta\nu_N}{2\pi \left[(\nu - \nu_0)^2 + \left(\frac{\Delta\nu_N}{2} \right)^2 \right]}$$

Poszerzenie linii widmowych

Widmo pobudzonego ośrodka jest superpozycją pojedynczych aktów emisji wszystkich jego atomów

- Poszerzenie jednorodne –
- Poszerzenie niejednorodne –

Jednorodne poszerzenie linii widmowych (dla gazów)

Mechanizm fizyczny:

- zderzenie emitującego z innym atomem
- skrócenie czasu Δt ciągu falowego

Wpływ parametrów pobudzonego gazu na szerokość linii widmowej:

- wzrost ciśnienia gazu -
- wzrost temperatury gazu –

Niejednorodne poszerzenie linii widmowych (dla gazów)

Zjawisko Dopplera

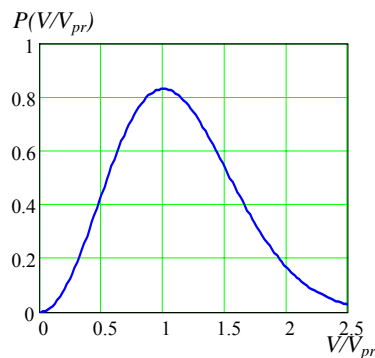
$$v_T = v_0 \cdot \left[1 \pm \frac{v_T}{c} \right]$$

Rozkład prędkości termicznych atomów (prawo

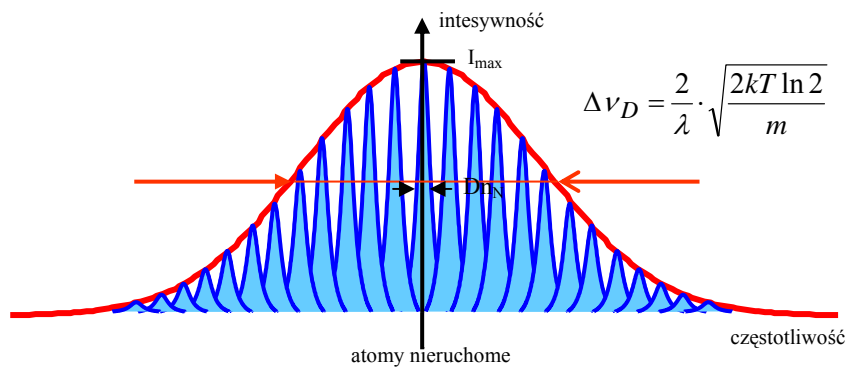
$$\frac{1}{2} m v_{pr}^2 = \frac{3}{2} kT$$

Prędkość
prawdopodobna v_{pr}

$$P\left(\frac{v}{v_{pr}}\right) = \frac{4}{\sqrt{\pi}} \cdot \left(\frac{v}{v_{pr}}\right)^2 \cdot \exp\left[-\left(\frac{v}{v_{pr}}\right)^2\right]$$



Poszerzenie dopplerowskie linii widmowej



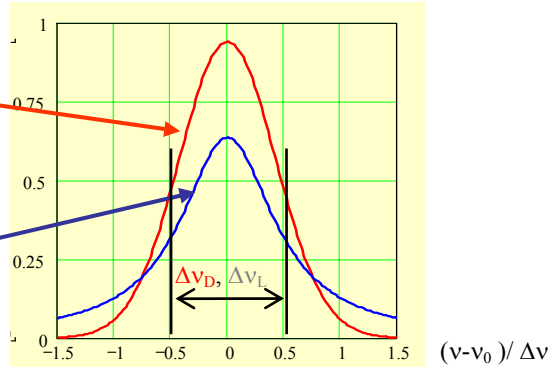
Kształt linii widmowej poszerzonej dopplerowsko

$$I_G = \frac{2}{\Delta \nu_D} \cdot \sqrt{\frac{\ln 2}{\pi}} \cdot \exp \left[- \left(\frac{\nu - \nu_0}{\frac{\Delta \nu_D}{2}} \right)^2 \ln 2 \right]$$

Porównanie kształtów linii widmowych

$$I_G = \frac{2}{\Delta \nu_D} \cdot \sqrt{\frac{\ln 2}{\pi}} \cdot \exp \left[- \left(\frac{\nu - \nu_0}{\frac{\Delta \nu_D}{2}} \right)^2 \ln 2 \right]$$

$$f_L(\nu) = \frac{\Delta \nu}{2\pi \cdot \left[(\nu - \nu_0)^2 + \left(\frac{\Delta \nu}{2} \right)^2 \right]}$$

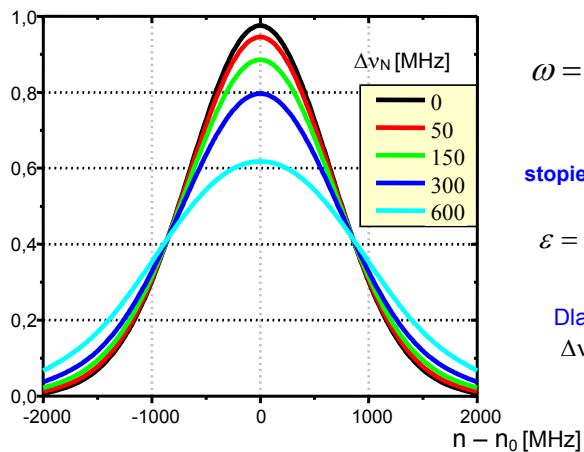


Normalizacja

- Te same szerokości połówek
- Ta sama intensywność (pole pod krzywą)

Rzeczywisty kształt linii widmowej (krzywej wzmacnienia)

$$f(\omega) = \exp(-\omega^2) - \left(\frac{2 \cdot \varepsilon}{\sqrt{\pi}}\right) \cdot \left[1 - 2 \cdot \omega \cdot \exp(-\omega^2) \cdot \int_0^{\infty} \exp(y^2) dy\right]$$



$$\omega = 2 \cdot \sqrt{\ln 2} \cdot \frac{\nu - \nu_0}{\Delta \nu_D}$$

stopień jednorodności poszerzenia linii

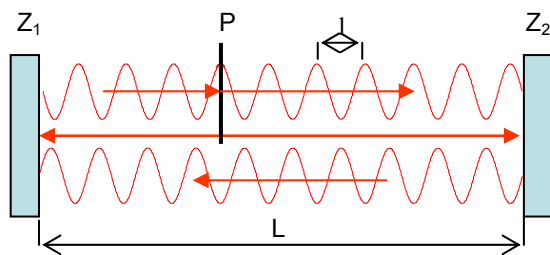
$$\varepsilon = \sqrt{\ln 2} \cdot \frac{\Delta \nu_N}{\Delta \nu_D}$$

Dla lasera He-Ne $\lambda = 6328$ nm

$\Delta \nu_D = 1500$ MHz, $\Delta \nu_N = 50-100$ MHz

Rezonatory laserowe

(dodatnia pętla sprzężenia zwrotnego)



Warunek zgodności fazy

$$2L = n \cdot \lambda$$

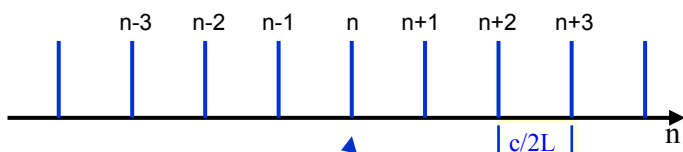
$$L = n \cdot \frac{\lambda}{2}$$

Fala stojąca

Częstotliwość rezonansowa

$$\nu_{rez} = n \cdot \frac{c}{2L}$$

Widmo częstotliwości rezonansowych rezonatora Fabry-Perot'a



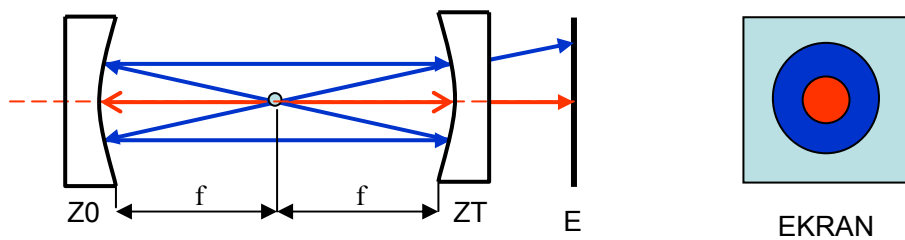
$$v_{rez} = n \cdot \frac{c}{2L} \Rightarrow \Delta v_{[\Delta n=1]} = \frac{c}{2L}$$

Częstotliwości rezonansowe - mody poosiowe TEM_{00n}

Mody niepoosiowe

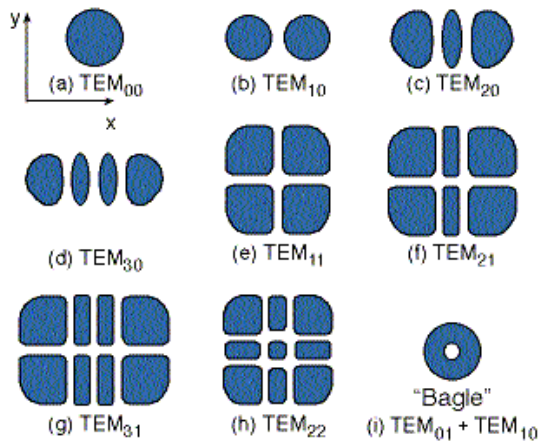
$$L = n \cdot \frac{\lambda}{2} \qquad L = n \cdot \frac{\lambda}{2} \cdot \cos \varphi$$

Rezonator konfokalny (współogniskowy)

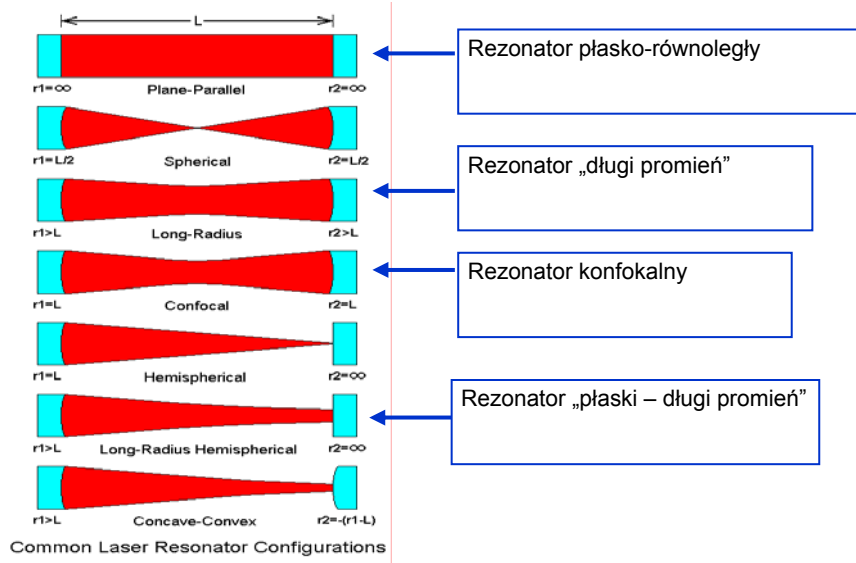


symetria prostokątna TEM_{xyz} symetria radialna TEM_{rfz}

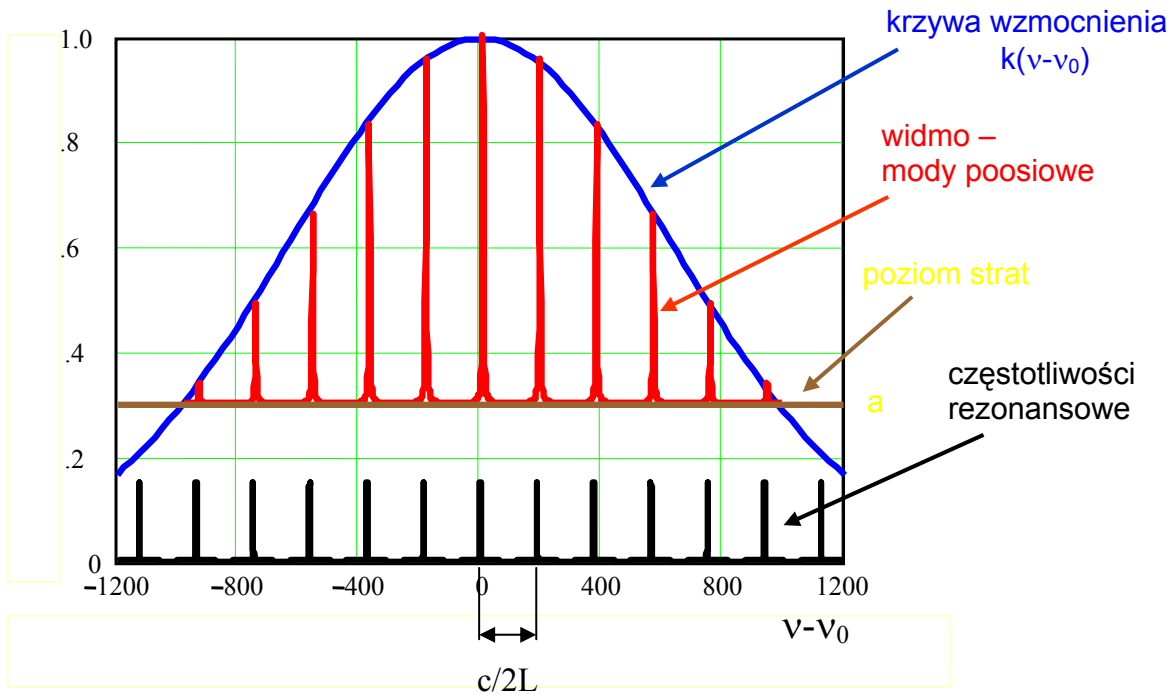
Widok modów niepoosiowych - symetria prostokątna



Podstawowe konfiguracje rezonatorów



Warunki generacji laserowej – widmo promieniowania



Efekt nasycenia wzmocnienia

zmniejszanie wartości wzmocnienia ośrodka aktywnego ze wzrostem mocy wzmacnianego promieniowania

dla poszerzenia jednorodnego

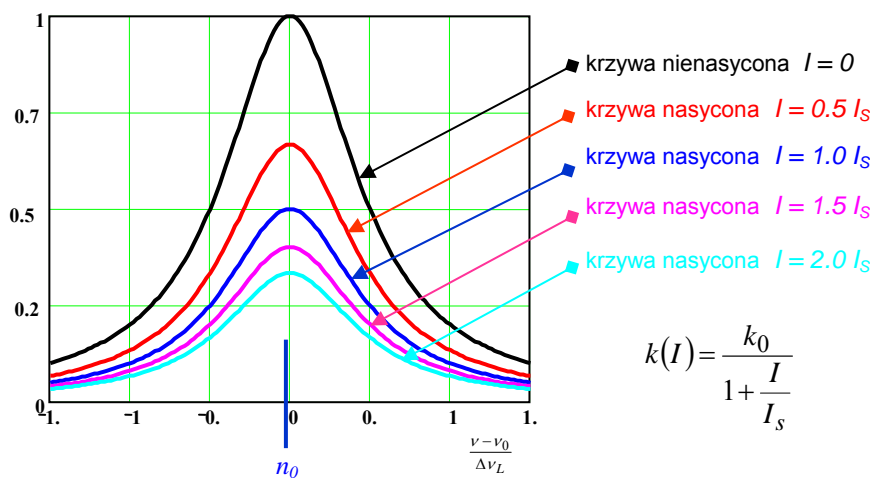
$$k(I) = \frac{k_0}{1 + \frac{I}{I_s}}$$

dla poszerzenia niejednorodnego

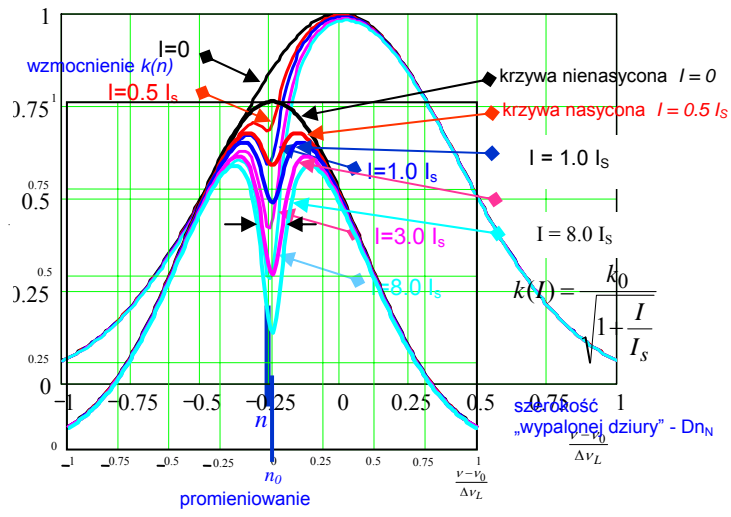
$$k(I) = \frac{k_0}{\sqrt{1 + \frac{I}{I_s}}}$$

Efekt nasycenia wzmocnienia dla linii poszerzonej jednorodnie

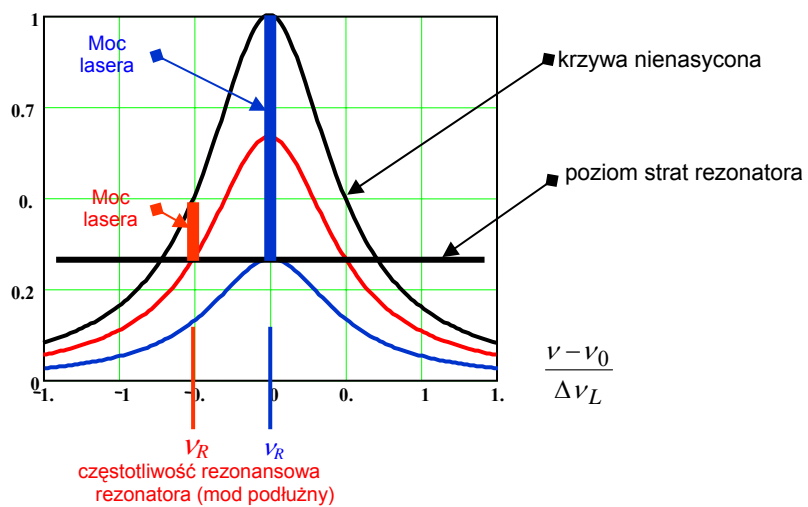
Wzmocnienie $k(n)$



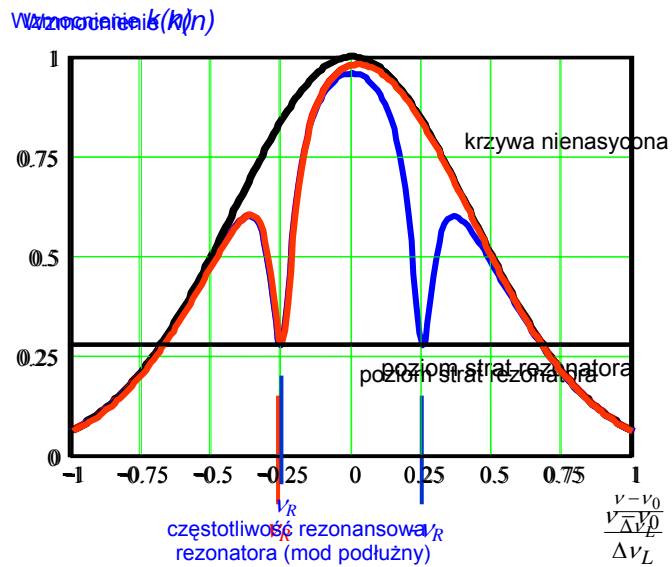
Efekt nasycenia wzmocnienia dla linii poszerzonej niejednorodnie



Efekt nasycenia wzmocnienia dla linii poszerzonej jednorodnie
w warunkach generacyjnych

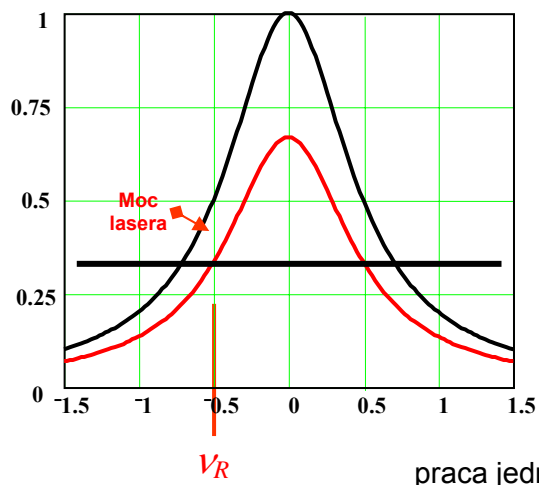


Efekt nasycenia wzmocnienia dla linii poszerzonej niejednorodnie
w warunkach generacyjnych

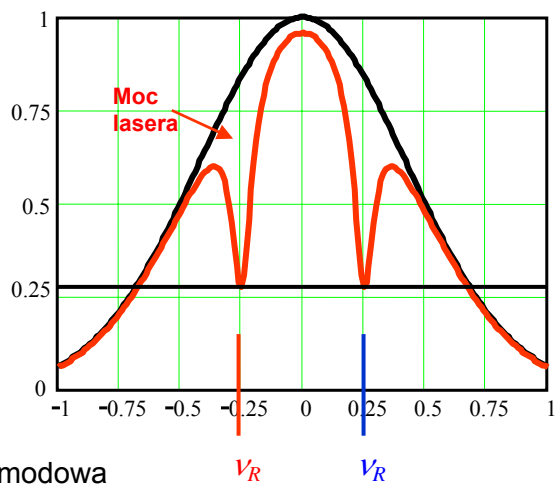


Moc wyjściowa lasera

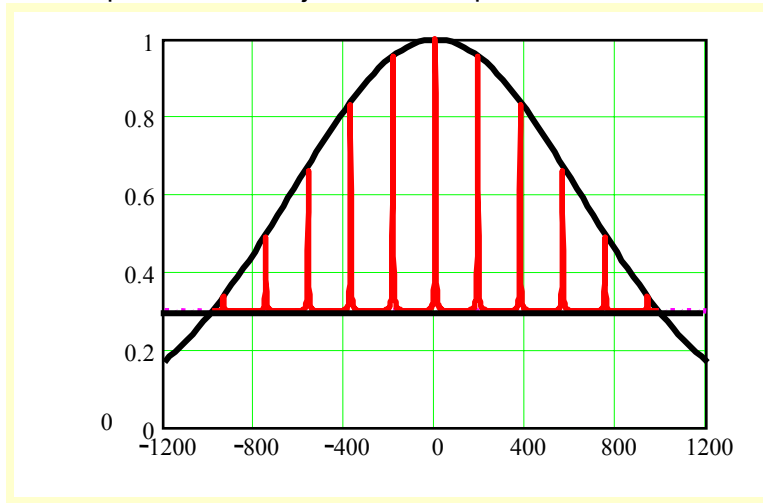
poszerzenie jednorodne



poszerzenie niejednorodne



poszerzenie niejednorodne – praca wielomodowa



Moc wyjściowa lasera

poszerzenie niejednorodne – praca wielomodowa

$$P = T \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot \sqrt{\pi} \cdot s \cdot X \cdot \operatorname{erf} \left(\sqrt{\ln(s \cdot X)} \right) - \sqrt{\ln(s \cdot X)} \right) \cdot I_s$$

gdzie:

s – poprawka na jednorodność poszerzenia linii

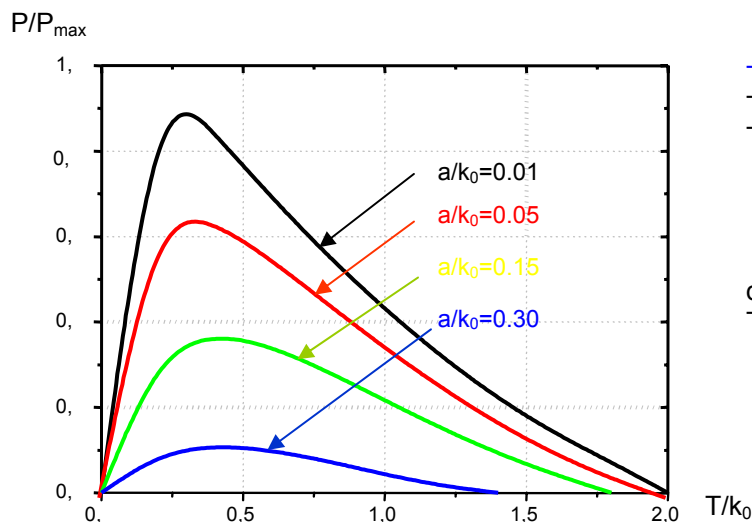
$$\operatorname{erf}(y) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \int_0^y \exp(-t^2) dt \quad s = 1 + \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \varepsilon \quad \varepsilon = \sqrt{\ln(2)} \cdot \frac{\Delta \nu_N}{\Delta \nu_D}$$

parametr pobudzenia X :

$$X = \frac{k_0}{a + T/2} \quad a - \text{straty stałe rezonatora} \quad T - \text{transmisja zwierciadła wyjściowego}$$

Wpływ transmisji zwierciadła na moc wyjściową lasera

rezonator niesymetryczny $T_1=0, T_2=T$



Transmisja progowa

$$T_{\text{prog}} + 2a = 2k_0 \\ T_{\text{prog}}/k_0 = 2(1 - a/k_0)$$

$$\text{dla } a/k_0 = 0 \\ T_{\text{prog}}/k_0 = 2$$

optymalna transmisja
 $dP/dT = 0$
