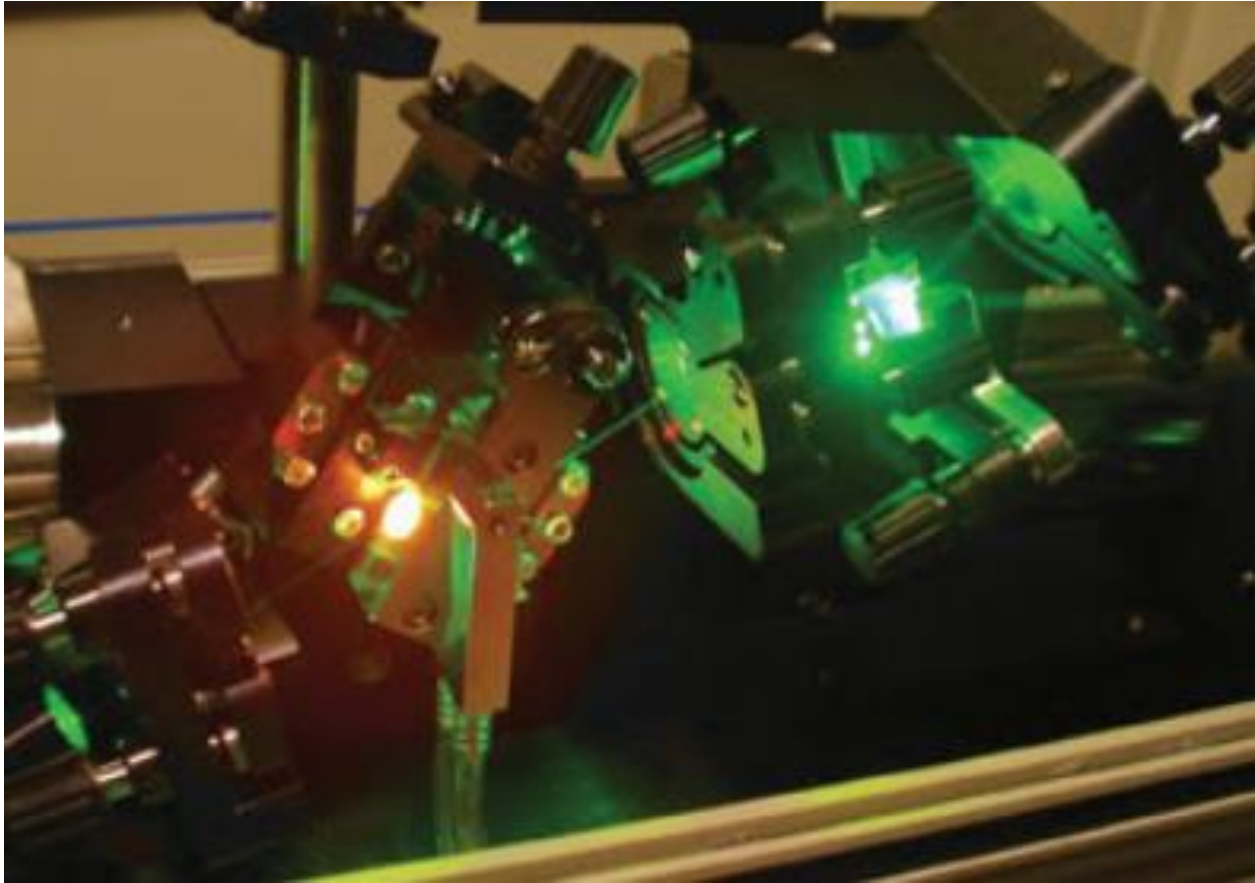

Optyka nieliniowa

DR HAB. INŻ. BEATA BROŻEK-PŁUSKA, PROFESOR UCZELNI

LASERY WIBRONOWE

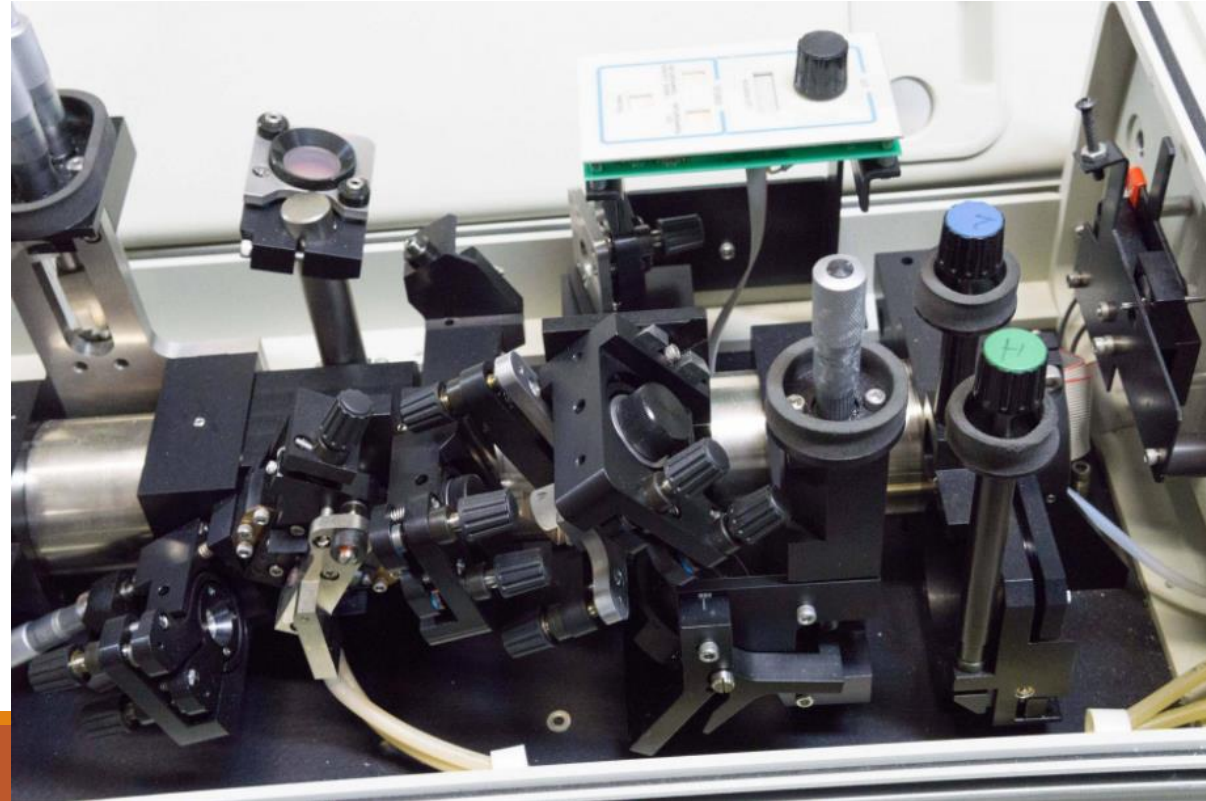


lasery barwnikowe impulsy pikosekundowe 10^{-12} s

lasery gazowe impulsy nanosekundowe 10^{-9} s

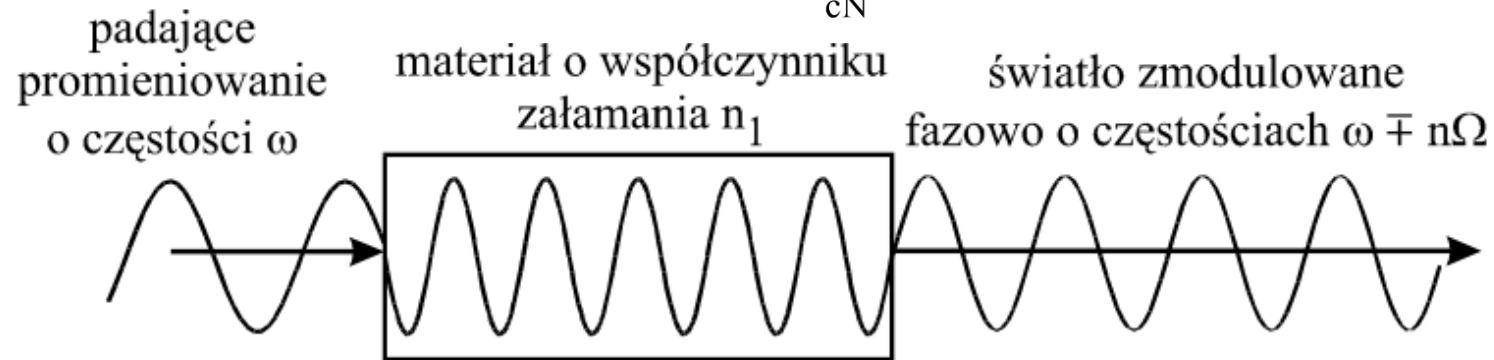
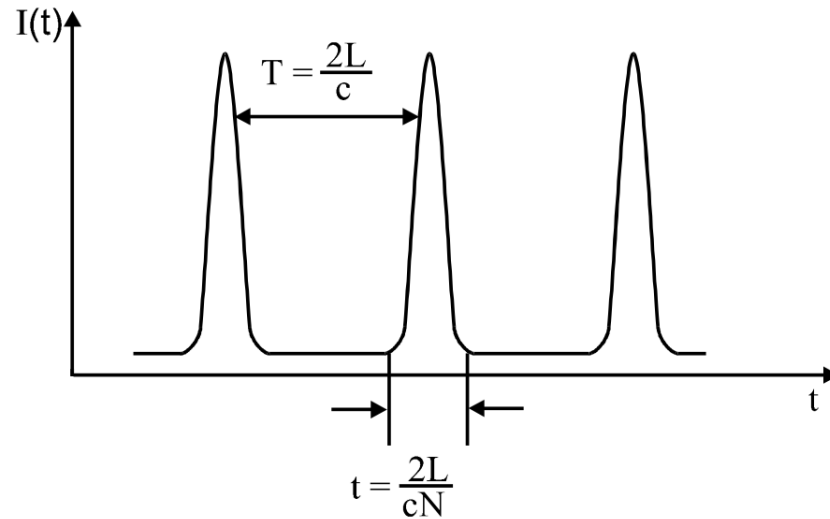
lasery na ciele stałym

lasery wibronowe impulsy femtosekundowe 10^{-15} s

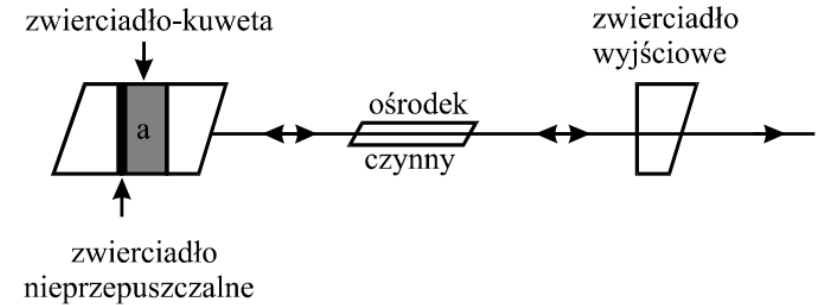


SYNCHRONIZACJA MODÓW LASERY WIBRONOWE

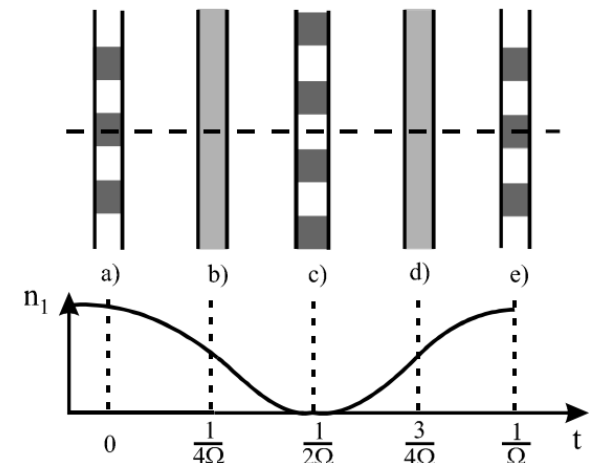
AKTYWNE
PASYWNE



Modulacja światła za pomocą periodycznych zmian współczynnika załamania światła n_1 .

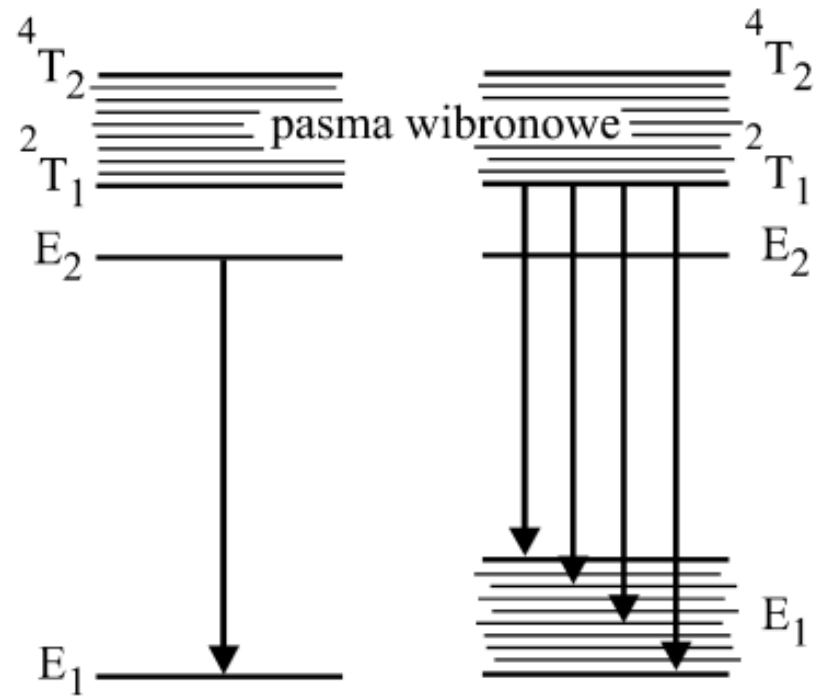


Synchronizacja pasywna osiągnięta metodą nasycających się absorbentów.



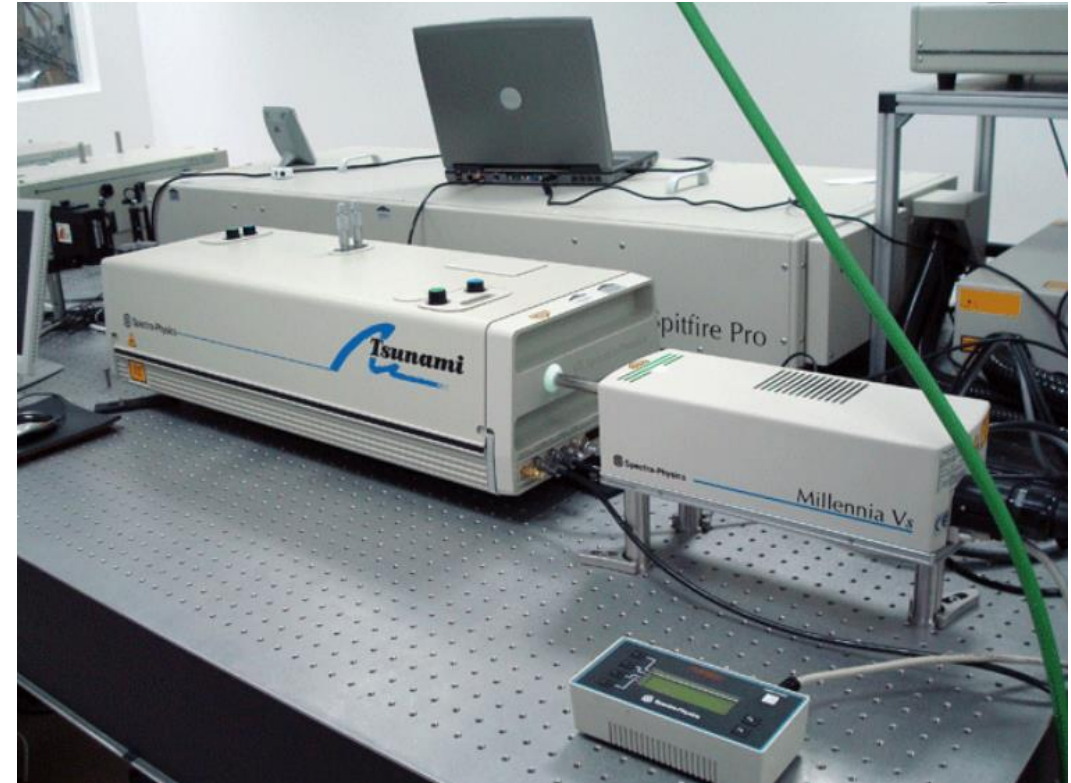
Ilustracja periodycznych zmian współczynnika załamania przez zmiany gęstości ośrodka wywołanych falą dźwiękową.

SYNCHRONIZACJA MODÓW LASERY WIBRONOWE



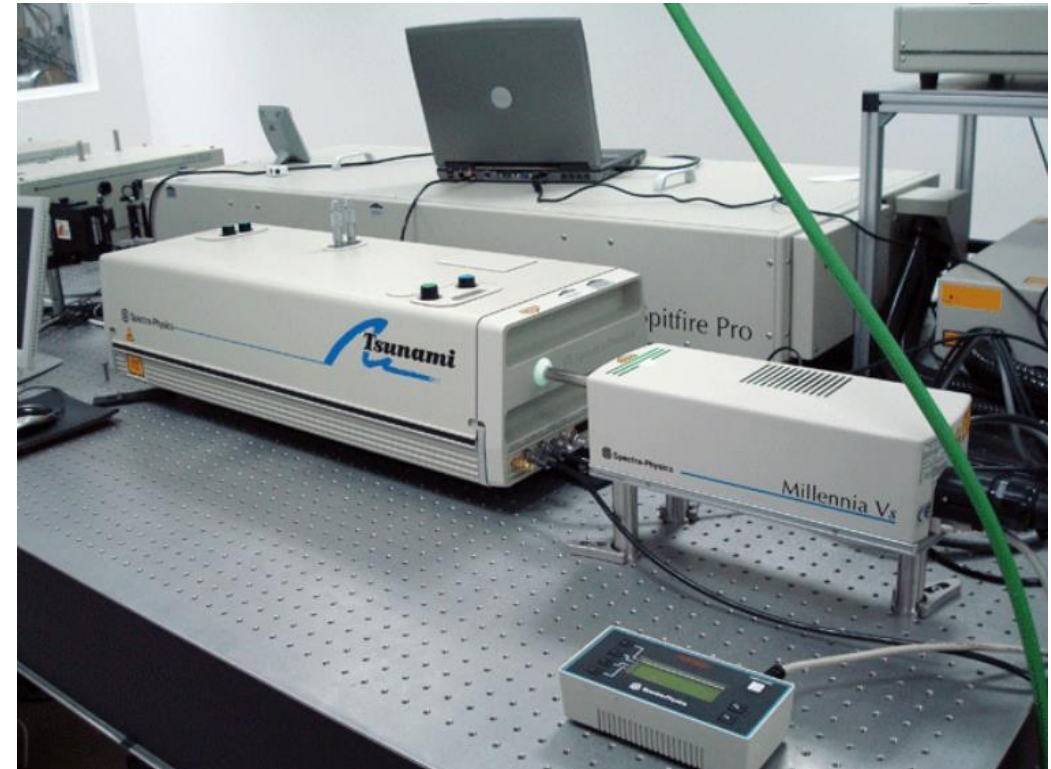
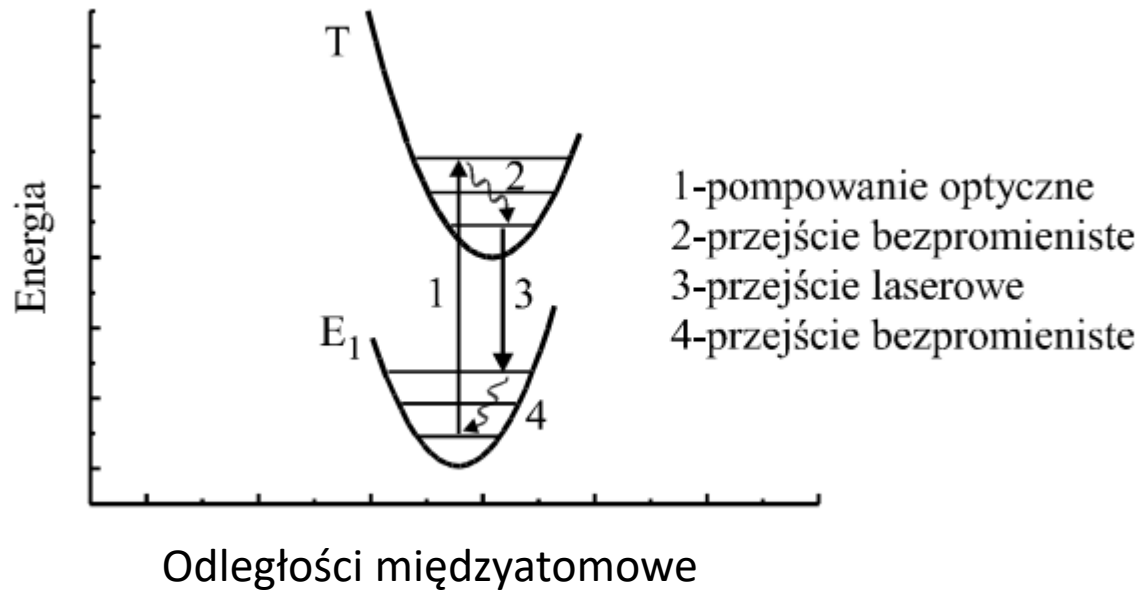
a) lasery nieprzestrjalne

b) lasery przestrjalne



LASERY WIBRONOWE, lasery na ciele stały – LASERY PRZESTRAJALNE

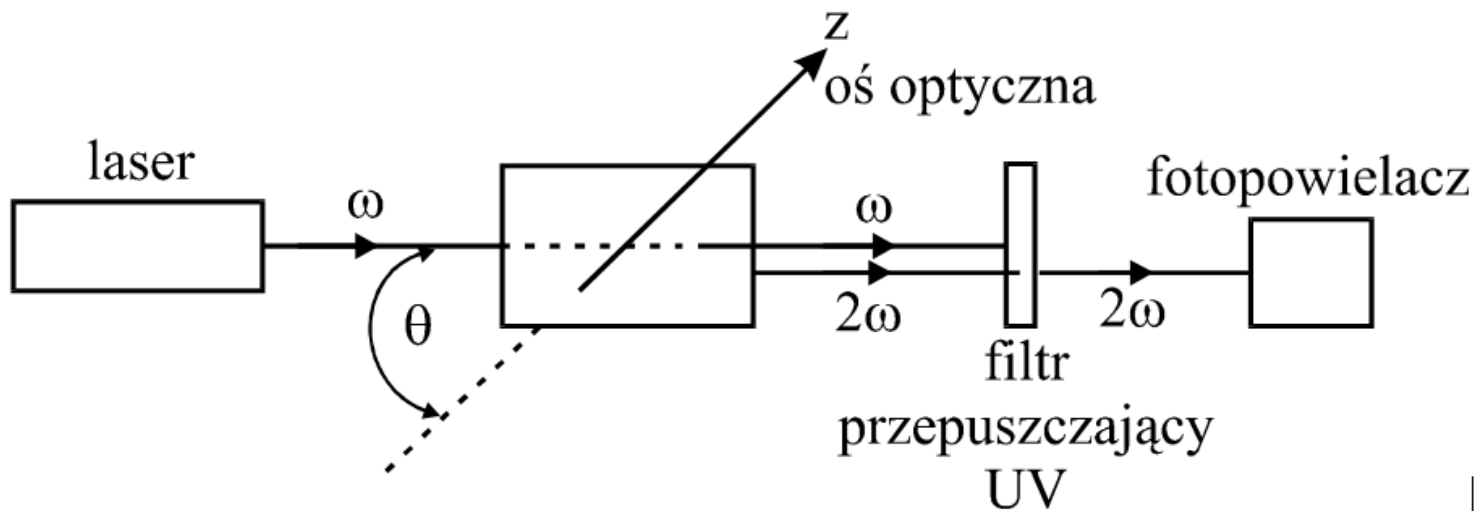
Wszystkie lasery przestrajalne na ciele stałym są czteropoziomowe



OPTYKA NIELINIOWA

SHG

Światło lasera rubinowego o długości fali 694,3 nm skierujemy na kryształ nieliniowy. Zmieniając kąt między kierunkiem wiązki laserowej i kierunkiem osi optycznej, przy pewnym kącie zauważymy, że wiązka światła laserowego, która wyszła z kryształu, ma dwie składowe: 694,3 nm oraz $694,3 \text{ nm}/2 = 347,15 \text{ nm}$. Tak więc obok składowej fundamentalnej, która nie zmienia swej częstości po przejściu przez kryształ, pojawia się dodatkowa składowa, zwana drugą harmoniczną o częstości 2 razy większej od częstości podstawowej. **Proces generacji drugiej harmonicznej nazywany jest również procesem SHG (od angielskiego skrótu *Second Harmonic Generation*).**



Zjawiska optyki nieliniowej pozwoliły znacznie rozszerzyć zakres widmowy stosowania laserów.

Schemat układu generującego drugą harmoniczną

OPTYKA NIELINIOWA

SHG

Prędkość fazowa v_f jest prędkością rozchodzenia się fal płaskich w ośrodku o współczynniku załamania $n(\omega)$:

$$v_f = \frac{\omega}{k} = \frac{c}{n(\omega)}$$

Dopasowanie fazowe (ang. *phase matching*)

$$\mathbf{k}_2(2\omega_1) = \mathbf{k}_1(\omega_1) + \mathbf{k}_1(\omega_1),$$

$$\mathbf{k}_3(\omega_3) = \mathbf{k}_1(\omega_1) + \mathbf{k}_2(\omega_2)$$

$$\Delta\mathbf{k} = \mathbf{k}_3(\omega_3) - \mathbf{k}_1(\omega_1) - \mathbf{k}_2(\omega_2) = 0$$

OPTYKA NIELINIOWA

SHG

Warunek ten należy rozumieć jako zasadę zachowania pędu dla układu 3 fotonów uczestniczących w procesie mieszania częstości, wektor falowy $\mathbf{k}$ bowiem związany jest z pędem fotonu $\mathbf{p}$ następująco: $\mathbf{p} = \hbar\mathbf{k}$.

$$\Delta\mathbf{k} = \mathbf{k}_3(\omega_3) - \mathbf{k}_1(\omega_1) - \mathbf{k}_2(\omega_2) = 0$$

OPTYKA NIELINIOWA

SHG

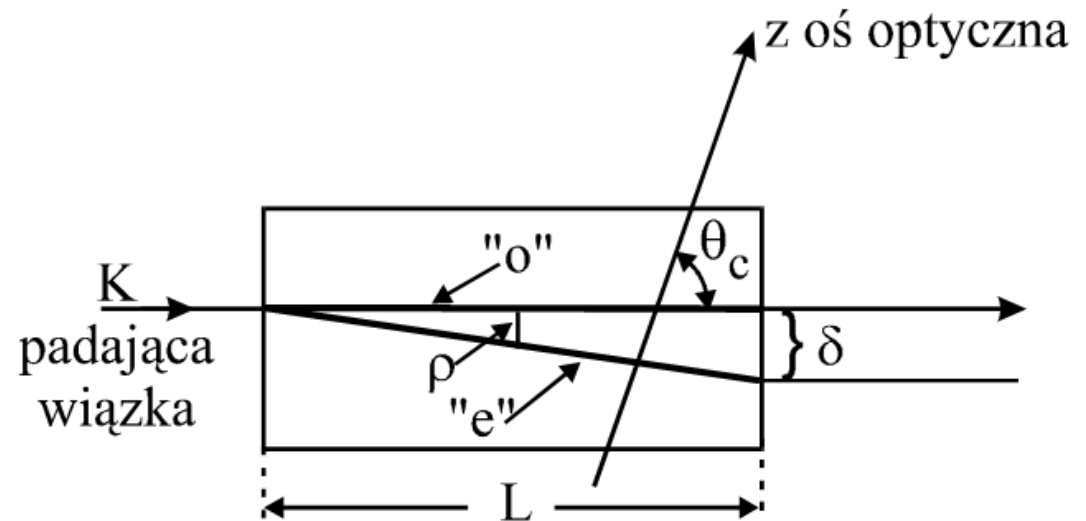
Inaczej

$$n(2\omega_1) = n(\omega_1)$$

Oznacza to, że druga harmoniczna może być wygenerowana z dużą wydajnością tylko wtedy, gdy współczynnik załamania dla częstości $2\omega_1$ jest równy współczynnikowi załamania dla częstości ω_1 . Jest to w większości przypadków niemożliwe, bo spełnienie warunku powyżej oznaczałoby, że **ośrodek nie wykazuje własności dyspersyjnych**.

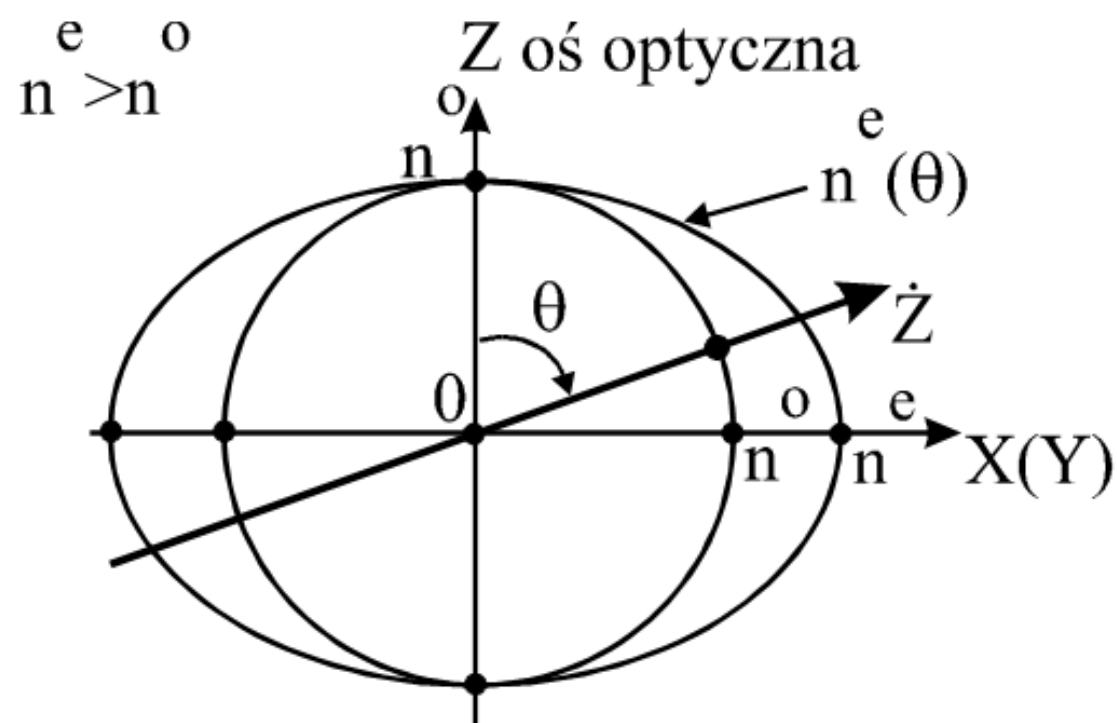
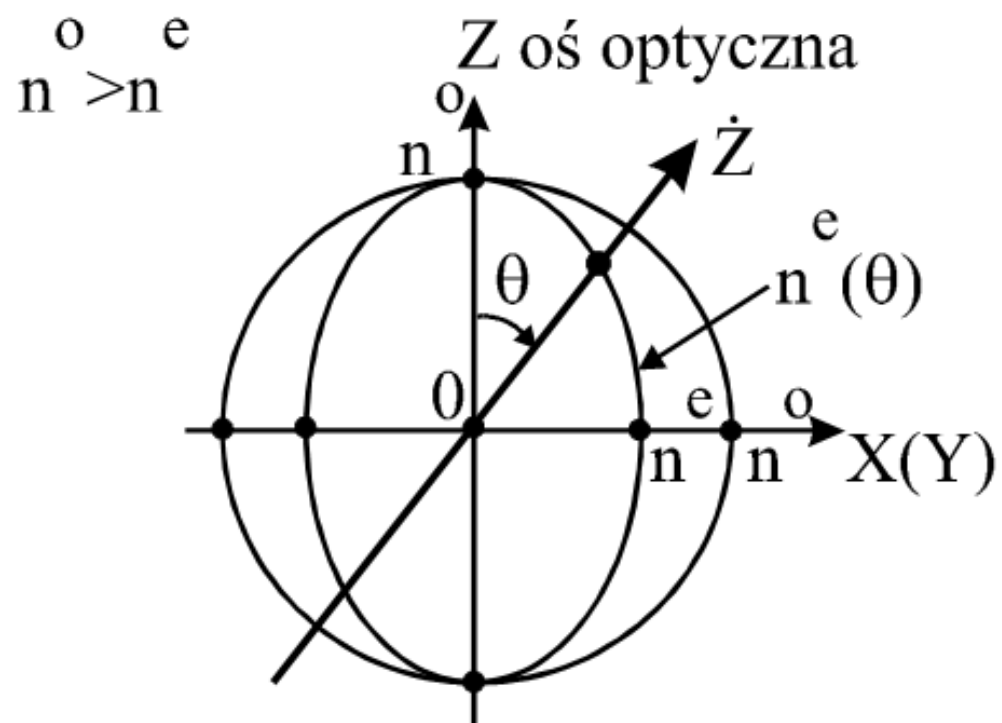
Kryształy dwójłomne

$$n_e(2\omega_1) = n_o(\omega_1)$$



OPTYKA NIELINIOWA

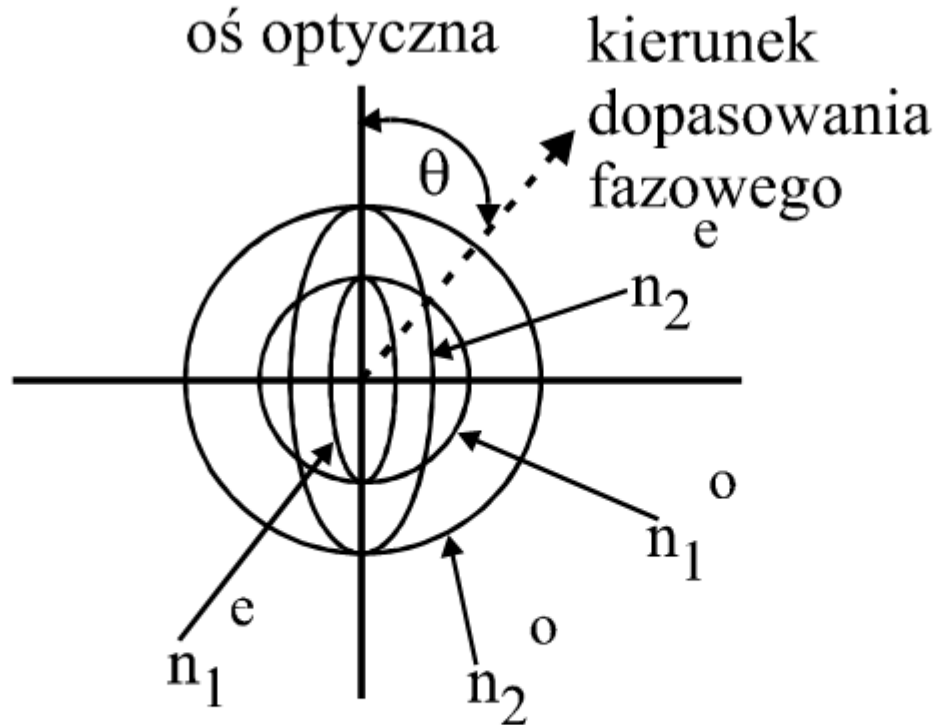
SHG



Przekroje powierzchni współczynnika załamania dla jednoosiowego kryształu dwójłomnego, a) ujemnego, b) dodatniego.

OPTYKA NIELINIOWA

SHG



Natężenie drugiej harmonicznej obserwowane wzdłuż tego kierunku w kryształach jest o kilka rzędów większe od natężenia wzdłuż innych kierunków.

Metoda, która polega na obrocie kryształu nieliniowego w celu znalezienia kąta θ nosi nazwę metody *dopasowania fazowego* lub metody *dopasowania współczynników załamania* (ang. *index matching technique*).

Kierunek dopasowania fazowego w jednoosiowym ujemnym kryształach dwójłomnym

OPTYKA NIELINIOWA

SHG

Rozróżniamy **dwa typy** dopasowania fazowego.

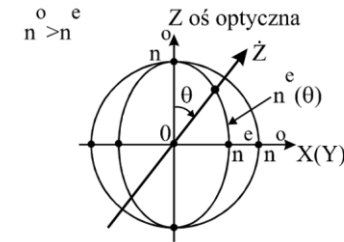
Jeżeli mieszające się fale o częstości ω_1 i ω_2 mają tę samą polaryzację, to częstość sumacyjna $\omega_3 = \omega_1 + \omega_2$ (SFG) spolaryzowana jest w płaszczyźnie prostopadłej do ich płaszczyzny polaryzacji. W tym wypadku mówimy o dopasowaniu fazowym I typu. W jednoosiowych **kryształach ujemnych** dopasowanie fazowe I typu – to spełnienie warunku

$$\mathbf{k}_1^0 + \mathbf{k}_2^0 = \mathbf{k}_3^e(\theta)$$

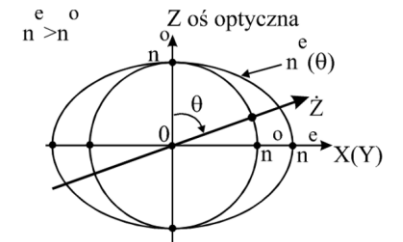
(oznaczamy je jako dopasowanie fazowe „ooe” lub oddziaływanie „ooe”), w jednoosiowych **kryształach dodatnich** zaś – to spełnienie warunku

$$\mathbf{k}_1^e(\theta) + \mathbf{k}_2^e(\theta) = \mathbf{k}_3^0$$

(oznaczamy je jako dopasowanie fazowe „eeo” lub oddziaływanie „eeo”)



ujemny



dodatni

OPTYKA NIELINIOWA

SHG

Rozróżniamy **dwa typy** dopasowania fazowego.

Jeżeli mieszające się fale ω_1 i ω_2 mają ortogonalne polaryzacje, realizowany jest przypadek dopasowania fazowego II typu.

Dla kryształów jednoosiowych ujemnych spełniony jest warunek

$$\mathbf{k}_1^0 + \mathbf{k}_2^e(\theta) = \mathbf{k}_3^e(\theta)$$

zwany dopasowaniem fazowym „oee”, lub

$$\mathbf{k}_1^e(\theta) + \mathbf{k}_2^0 = \mathbf{k}_3^e(\theta)$$

zwany dopasowaniem fazowym „eoe”.

Dla kryształów jednoosiowych dodatnich dopasowanie II typu spełnia warunki

$$\mathbf{k}_1^0 + \mathbf{k}_2^e(\theta) = \mathbf{k}_3^0 \quad (\text{dopasowanie fazowe „oeo”})$$

$$\mathbf{k}_1^e(\theta) + \mathbf{k}_2^0 = \mathbf{k}_3^0(\theta) \quad (\text{dopasowanie fazowe „eoo”}).$$

OPTYKA NIELINIOWA

SHG

Z najczęściej stosowanych kryształów nieliniowych kryształ BBO jest kryształem I typu w generowaniu SFG, kryształ KTP – II typu w generowaniu SFG i DFG, LiNbO_3 – I typu (DFG), AgGaS_2 – II typ (DFG).

NLO Crystals



BBO Crystal

Beta-BaB₂O₄(BBO) is a nonlinear optical crystal which combines a number of unique features. These features include wide transparency and phase matchin.. [More](#)



LBO

Lithium Triborate (LiB₃O₅ or LBO) is an attractive nonlinear optical crystal. Main Features: Broad transparency range from 160nm in UV to 2600nm in.. [More](#)



BIBO

BiB₃O₆(BIBO) is a newly developed Nonlinear Optical Crystal. It has advanced characteristic for the NLO application broad transparency range from 286nm.. [More](#)



LiNbO3

Lithium Niobate(LiNbO₃) Crystal is widely used as frequency doublers for wavelength 1um and optical parametric oscillators (OPO) pumped at 1064 nm as .. [More](#)



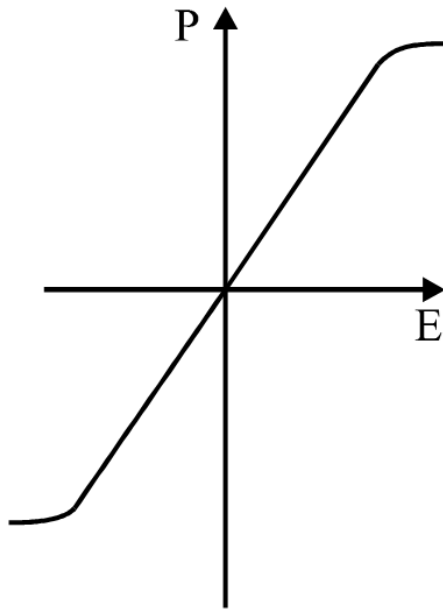
KTP

Potassium Titanium Oxide Phosphate (KTiOPO₄), or KTP, is an efficient nonlinear optical crystal in the visible to infrared spectral region with relat.. [More](#)

OPTYKA NIELINIOWA

SHG

SHG a środek inwersji



~~SHG~~

**Brak środka inwersji
w kryształach jest warunkiem
koniecznym, ale
nie dostatecznym.**

Zależność polaryzacji P od natężenia pola elektrycznego E w układach z makroskopowym środkiem inwersji

OPTYKA NIELINIOWA

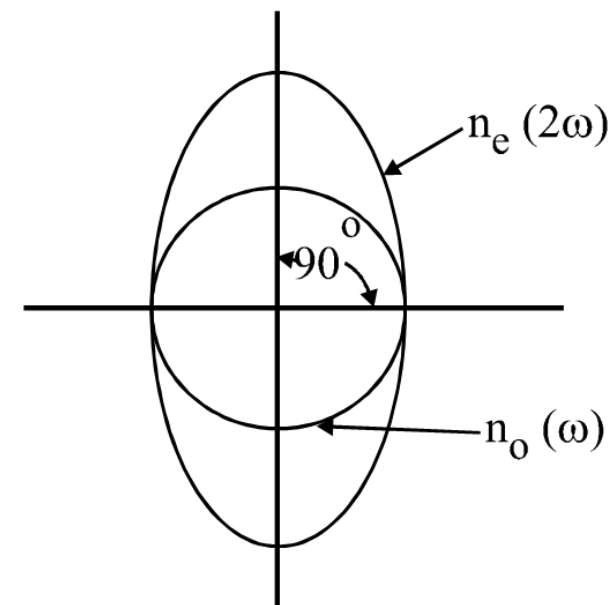
SHG

Początkowo najczęściej stosowanym kryształem był KDP (kwaśny fosforan potasu – *potassium dihydrogen phosphate*), który dla promieniowania o długości fali $\lambda = 694,3 \text{ nm}$ (laser rubinowy) ma następujące współczynniki załamania promienia zwyczajnego n_o i nadzwyczajnego n_e : $n_o(\omega) = 1,50$; $n_e(\omega) = 1,46$; $n_o(2\omega) = 1,53$; $n_e(2\omega) = 1,48$. Wartość kąta dopasowania fazowego wynosi $50,4^\circ$. Kryształy KDP i ADP (ang. *ammonium dihydrogen phosphate*) mają zwykle grubości rzędu centymetrów i wydajność rzędu 30%.

LiNbO₃

Niobian litu

160°C



Dopasowanie fazowe pod kątem 90° .

OPTYKA NIELINIOWA

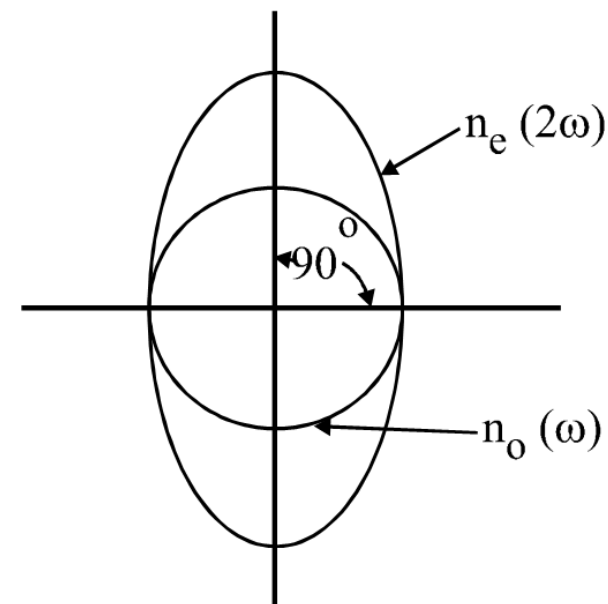
SHG

Physical and Optical Properties:

Crystal Structure	Trigonal, space group R3c
Cell Parameters	$a=0.515, c=13.863, Z=6$
Melting Point	1255 +/- 5°C
Curie Point	1140 +/- 5°C
Mohs Hardness	5
Density	4.64 g/cm ³
Absorption Coefficient	~ 0.1%/cm @ 1064 nm
Solubility	insoluble in H ₂ O
Relative Dielectric Constant	$\epsilon^{T11}/\epsilon_0$: 85
	$\epsilon^{T33}/\epsilon_0$: 29.5
Thermal Expansion Coefficients at 25°C	$\parallel a, 2.0 \times 10^{-6}/K @ 25^\circ C$
	$\parallel c, 2.2 \times 10^{-6}/K @ 25^\circ C$
Thermal Conductivity	38 W /m /K @ 25°C
Transparency Range	420 - 5200 nm
Refractive Indices	$n_e = 2.146, n_o = 2.220 @ 1300 \text{ nm}$
	$n_e = 2.156, n_o = 2.322 @ 1064 \text{ nm}$
	$n_e = 2.203, n_o = 2.286 @ 633 \text{ m}$
Optical Homogeneity	$\sim 5 \times 10^{-5} / \text{cm}$
Sellmeier Equations (l in mm)	$n_o^2(l) = 4.9048 + 0.11768/(l^2 - 0.04750) - 0.027169l^2$
	$n_e^2(l) = 4.5820 + 0.099169/(l^2 - 0.04443) - 0.021950 l^2$

LiNbO₃
Niobian litu

160°C



Dopasowanie fazowe pod kątem 90°.

OPTYKA NIELINIOWA

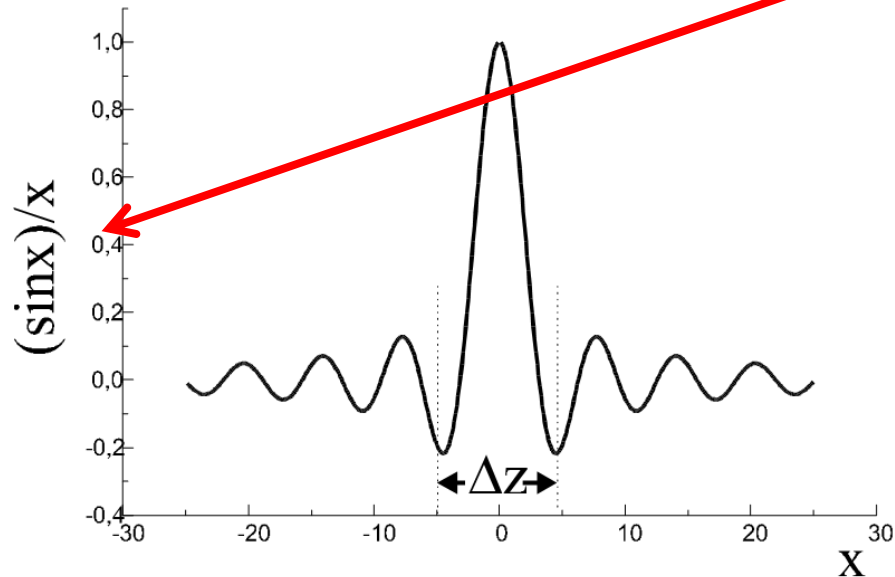
Ważnym parametrem dla krótkich impulsów jest tzw. **opóźnienie grupowe** (ang. *group delay*).

Prędkość fazowa wyraża się opisuje prędkość rozchodzenia się czoła płaskiej fali monochromatycznej.

$$v_f = \frac{\omega}{k} = \frac{c}{n(\omega)}$$

Amplituda

Impuls krótki nie jest monochromatyczny!!!



Oznacza to, że im większa monochromatyczność wiązki ($k \rightarrow 0$), tym większa rozciągłość przestrzenna pakietu ($\Delta z \rightarrow \infty$, czyli fala staje się płaska).

OPTYKA NIELINIOWA

Z upływem czasu środkowy punkt pakietu fal odpowiadający maksymalnej amplitudzie przemieszcza się w przestrzeni z prędkością

$$v_g = \left(\frac{d\omega}{dk} \right)_0$$

którą nazywamy *prędkością grupową*

Założmy, że w kryształ o długości l generujemy drugą harmoniczną za pomocą impulsów o czasie trwania wiązki podstawowej t_p

Niech będzie spełniony warunek dopasowania fazowego w kryształ, tzn. prędkości fazowe wiązki podstawowej i drugiej harmoniczej będą jednakowe

$$v_{ph}(\omega) = v_{ph}(2\omega)$$

Nie oznacza to jednak, że prędkości grupowe będą również jednakowe

OPTYKA NIELINIOWA

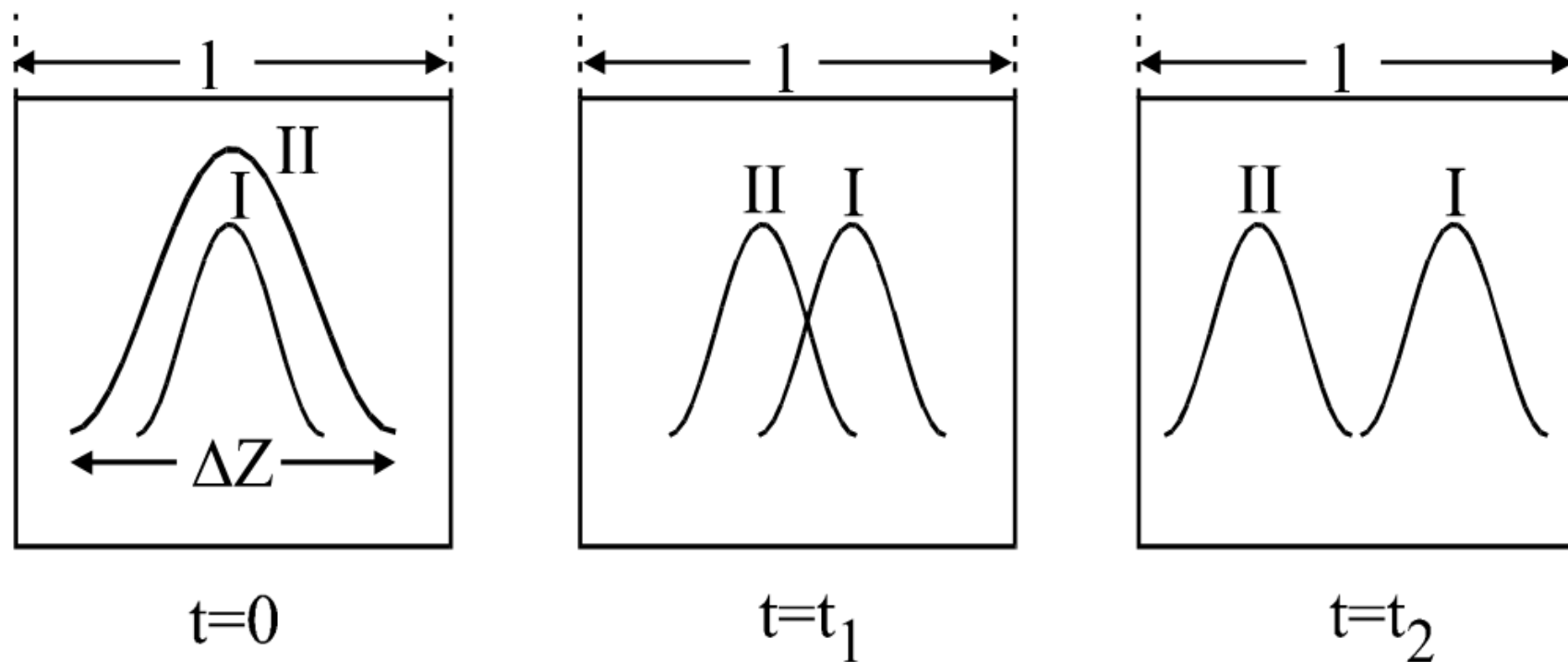
$$t_g^1 = \frac{l}{v_g^1} = l \left(\frac{dk}{d\omega_1} \right) = \frac{l}{c} \frac{d(n_1 \omega_1)}{d\omega_1} = \frac{l}{c} \left[\frac{dn_1}{d\omega_1} \omega_1 + n_1 \right] \quad \text{Wiązka podstawowa}$$

$$t_g^2 = \frac{l}{v_g^2} = l \left(\frac{dk}{d\omega_2} \right) = \frac{l}{c} \frac{d(n_2 \omega_2)}{d\omega_2} = \frac{l}{c} \left[\frac{dn_2}{d\omega_2} \omega_2 + n_2 \right] \quad \text{SHG}$$

opóźnienie paczki falowej drugiej harmonicznej w stosunku do składowej fundamentalnej wynosi

$$\Delta t = t_g^2 - t_g^1 = \frac{l}{c} \left[\frac{dn_1}{d\lambda_1} \lambda_1 - \frac{dn_2}{d\lambda_2} \lambda_2 \right]$$

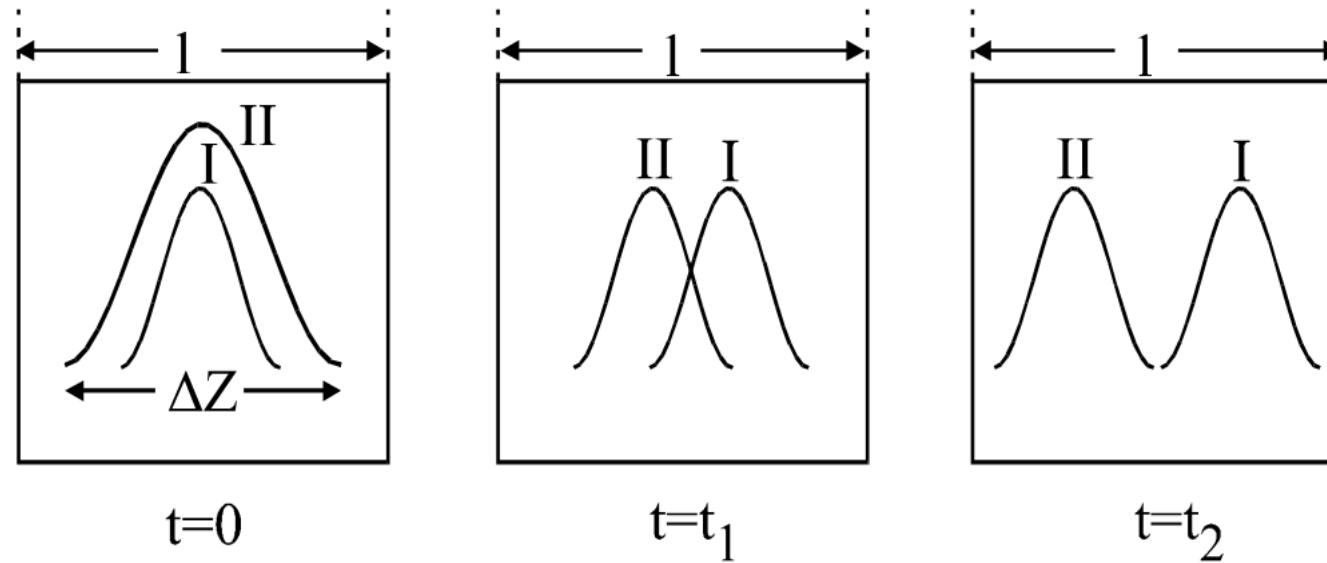
OPTYKA NIELINIOWA



Schemat ilustrujący konsekwencje różnej prędkości grupowej dla wiązki fundamentalnej i II harmonicznej

$\Delta t \nearrow \text{SHG} \searrow$

OPTYKA NIELINIOWA



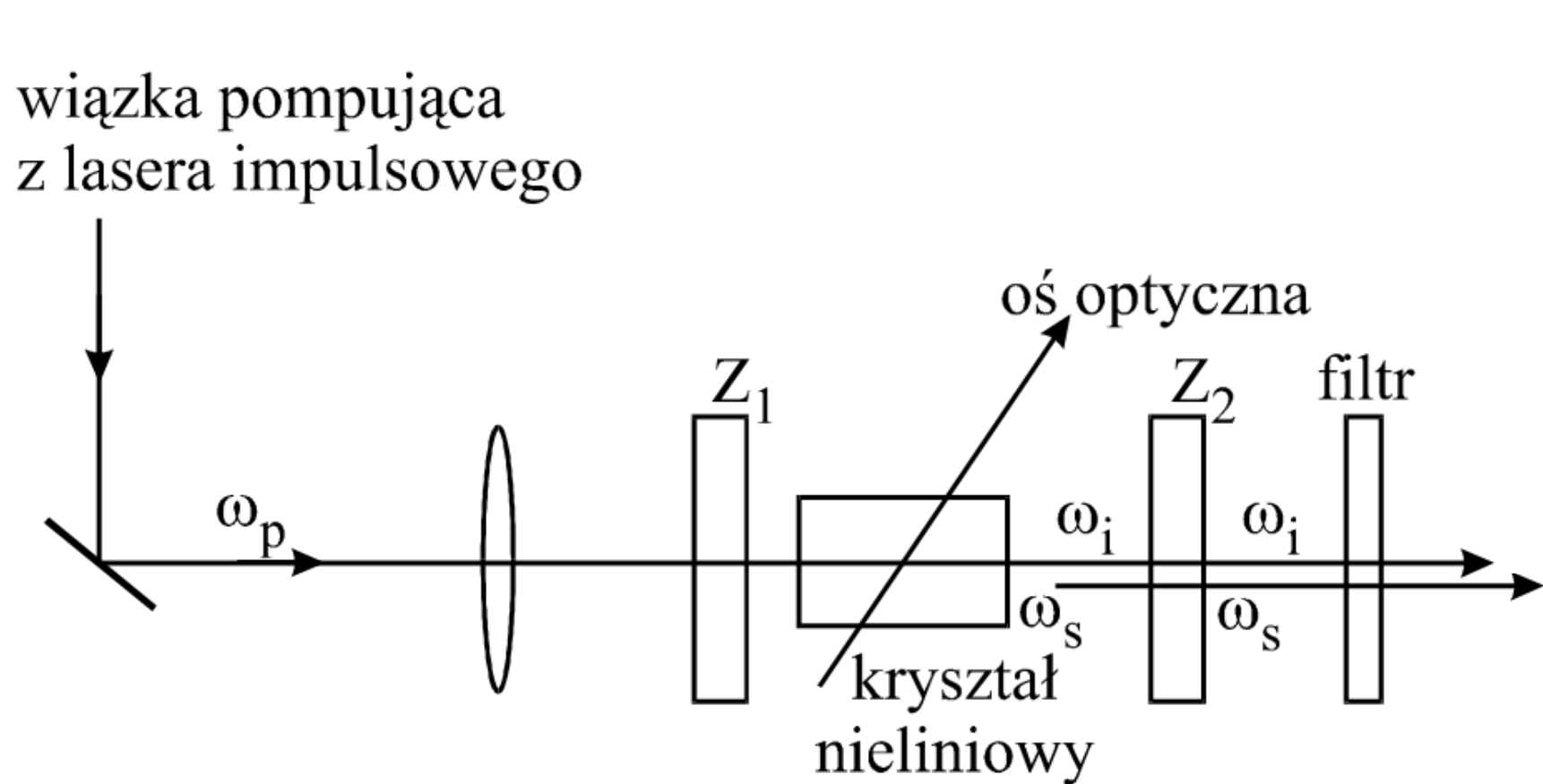
Schemat ilustrujący konsekwencje różnej prędkości grupowej dla wiązki fundamentalnej i II harmonicznej

Przykładowe wartości opóźnień grupowych t dla stosowanych kryształów są następujące: 6 ps/cm dla LiNbO₃; 0,7 ps/cm, dla LiIO₃; 0,08 ps/cm dla KDP.

$\Delta t \nearrow \text{SHG} \searrow$

OPTYKA NIELINIOWA

optical parametric oscillator - OPO



$$\omega_p = \omega_i + \omega_s$$

$$\mathbf{k}_p = \mathbf{k}_i + \mathbf{k}_s$$

$$\Delta k = \mathbf{k}_p - \mathbf{k}_i - \mathbf{k}_s = 0$$

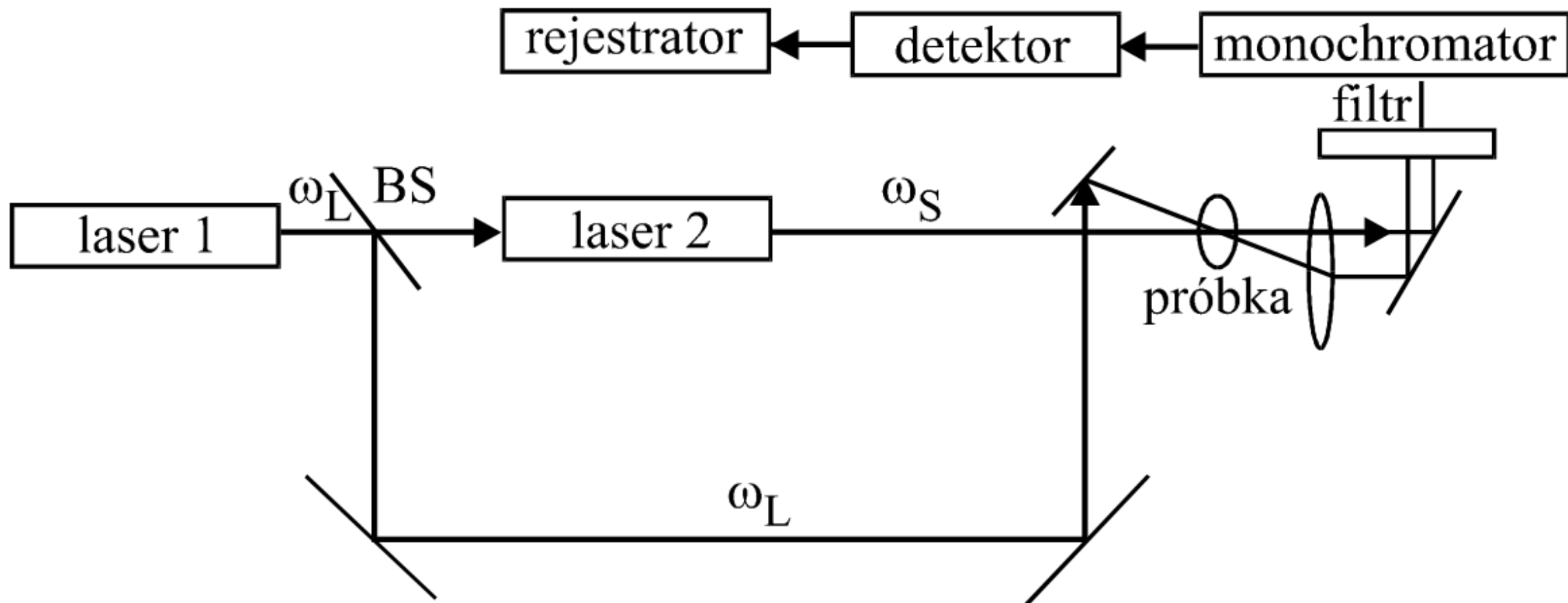
$$n_p \omega_p = n_s \omega_s + n_i \omega_i$$

Oprócz oscylatorów parametrycznych (OPO) te same zjawiska nieliniowe zachodzą w generatorze parametrycznym (OPG) i wzmacniaczu parametrycznym (OPA).

Generator parametryczny różni się od oscylatora parametrycznego tym, że kryształ nie jest umieszczony w rezonatorze optycznym.

We wzmacniaczu parametrycznym (OPA) na kryształ padają dwie wiązki laserowe.

OPTYKA NIELINIOWA



Schemat aparatury CARS

Opracowanie dla chętnych

Zjawiska dyspersyjne mające wpływ na czas trwania impulsów pikosekundowych i femtosekundowych. Dyspersja prędkości grupowej (GVD)

Dla laserów femtosekundowych, szczególnie dla innych impulsów o długości trwania poniżej 100 fs, własności dyspersyjne ośrodka czynnego i elementów optycznych w rezonatorze **wpływają na czas trwania impulsu**. Ponadto wiązka wyemitowana z lasera przechodzi zazwyczaj przez dodatkowe elementy optyczne (lustra, pryzmaty, kryształy, płytki światłodzielące, filtry), zanim dotrze do detektora. Trzeba mieć świadomość, że elementy optyczne wpływają na czas trwania impulsu.

Rozróżniamy dwa główne mechanizmy powodujące zniekształcenie impulsu: **dyspersja prędkości grupowej** (ang. *group velocity dispersion* - GVD) oraz **automodulacja fazy** (self phase modulation - SPM) spowodowana nieliniowym współczynnikiem załamania.

GVD

Kiedy impuls przechodzi przez dyspersyjny ośrodek (np. filtr) lub odbija się od dyspersyjnej powierzchni (np. zwierciadło), różne składowe widmowe $E(\omega)$ impulsu poddane są różnej modyfikacji amplitudy $A(\omega)$ i fazy $\Phi(\omega)$.

$$\tau' = \tau \left(1 + \frac{1}{\omega_F^2 \tau^2} \right)^{1/2}$$

Widać, że impuls przechodzący przez filtr zostaje wydłużony. Im mniejsza szerokość widmowa filtra tym dłuższy impuls.

$$\tau' = \tau \sqrt{1 + \frac{\tau_c^4}{\tau^4}}$$

Ze wzoru wynika, że dyspersja drugiego rzędu powoduje wydłużenie impulsu czasowego. Im krótszy impuls τ wchodzi do ośrodka dyspersyjnego, tym większe jest wydłużenie impulsu τ' po wyjściu z ośrodka. Dyspersja drugiego rzędu odgrywa więc rolę przede wszystkim dla impulsów krótkich, rzędu femtosekund. W przypadku impulsów dłuższych niż setki femtosekund efekt ten jest staje się coraz bardziej zaniedbywalny i impuls czasowy przechodzi przez element dyspersyjny niezniekształcony.

GVD

$$\frac{d^2\Phi}{d\omega^2} = \left(\frac{2}{c} \frac{dn}{d\omega} + \frac{\omega}{c} \frac{d^2n}{d\omega^2} \right) L = \frac{d^2k}{d\omega^2} L$$

