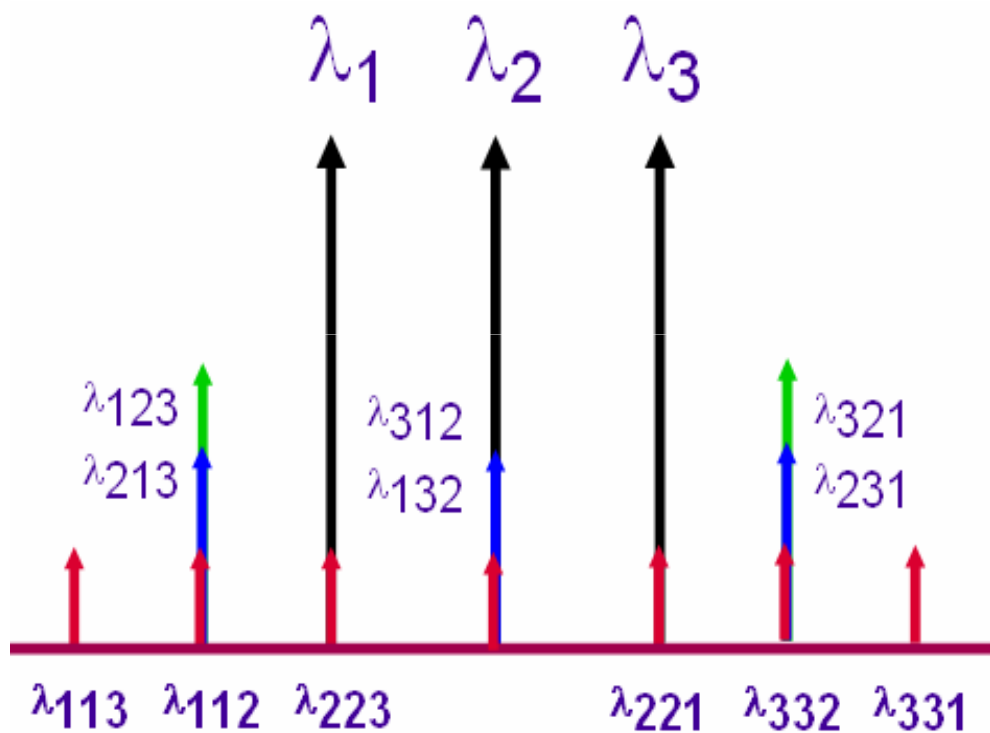


Nelinearni pojavi v vlaknu

Štiri-fotonsko mešanje



$$P(t) \propto \chi^{(1)} E(t) + \chi^{(2)} E^2(t) + \chi^{(3)} E^3(t) + \dots$$

$$D = \varepsilon_0 E + P$$

Mobitel d.d.,
izobraževanje

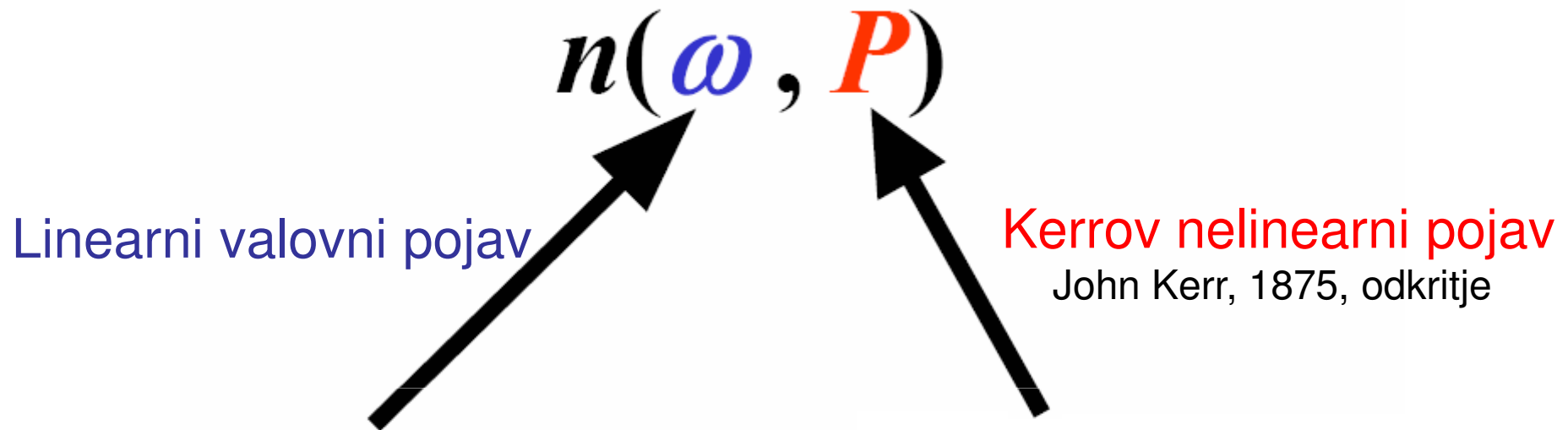
23. 4. 2010,
predavanje 7

Prof. dr. Jožko
Budin

Vsebina

- **Nelinearni pojavi drugega reda**
 - Elektrooptični pojav, Pockelsov pojav
- 2. **Nelinearni pojavi tretjega reda**
 - 2.1 Nelinearna refrakcija:
 - lastna fazna modulacija
 - prečna fazna modulacija
 - štirivalovno mešanje
 - 2.2 Nelinearno sipanje:
 - Ramanovo sipanje
 - Brillouinovo sipanje
- 3. **Fazna konjugacija**
- 4. **Drugi**

Učinek lomnega količnika



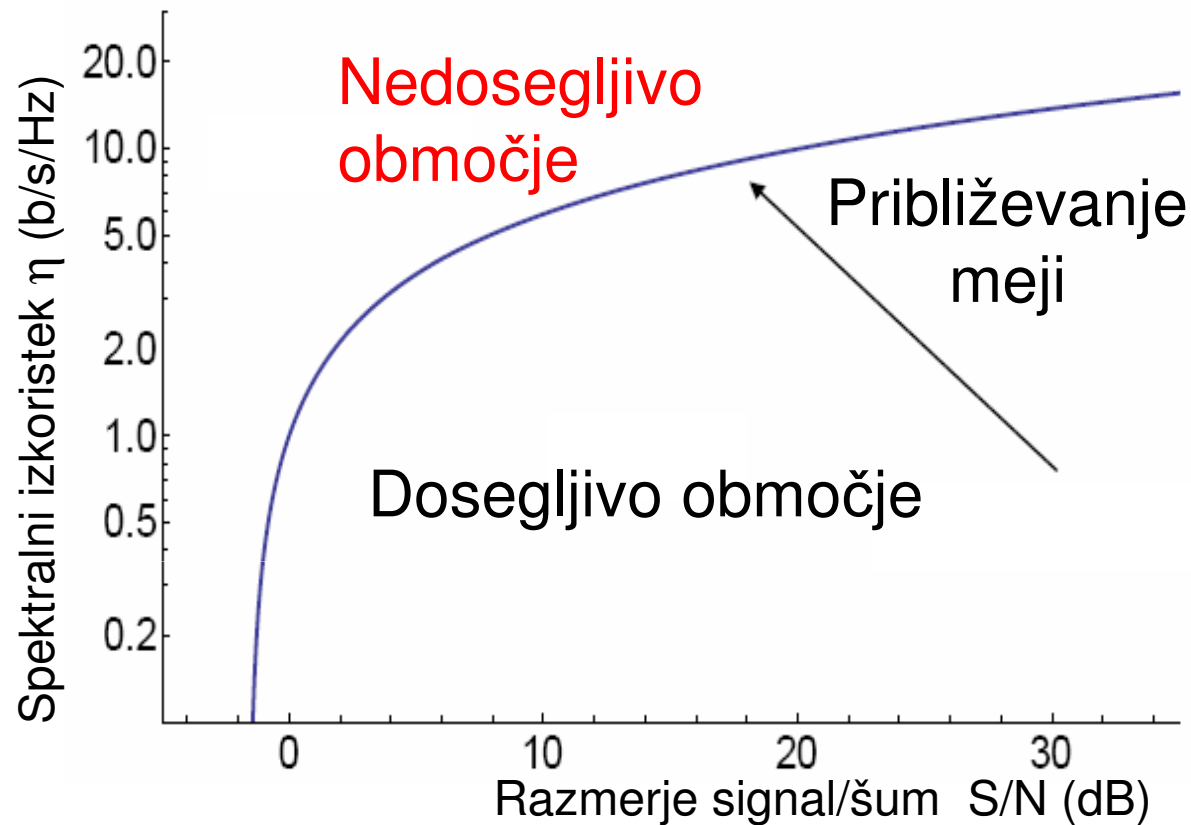
Odvisnost od frekvence:

- disperzija

Odvisnost od gostote moči:

- fazna modulacija
- valovno mešanje
- stimulirano sipanje

Shannonova mejna kapaciteta kanala



Načini doseganja večjega spektralnega izkoristka:

- Večje razmerje S/N
- Zahtevnejši modulacijski formati
- Dva polarizacijsko ortogonalna kanala
- OFDM in koherentni sprejem

$$B \leq C \quad \text{b/s}$$

$$C = \Delta f \log_2(1 + S/N)$$

$$\eta = C/\Delta f$$

$$S = E_b B$$

$$N = N_0 \Delta f$$

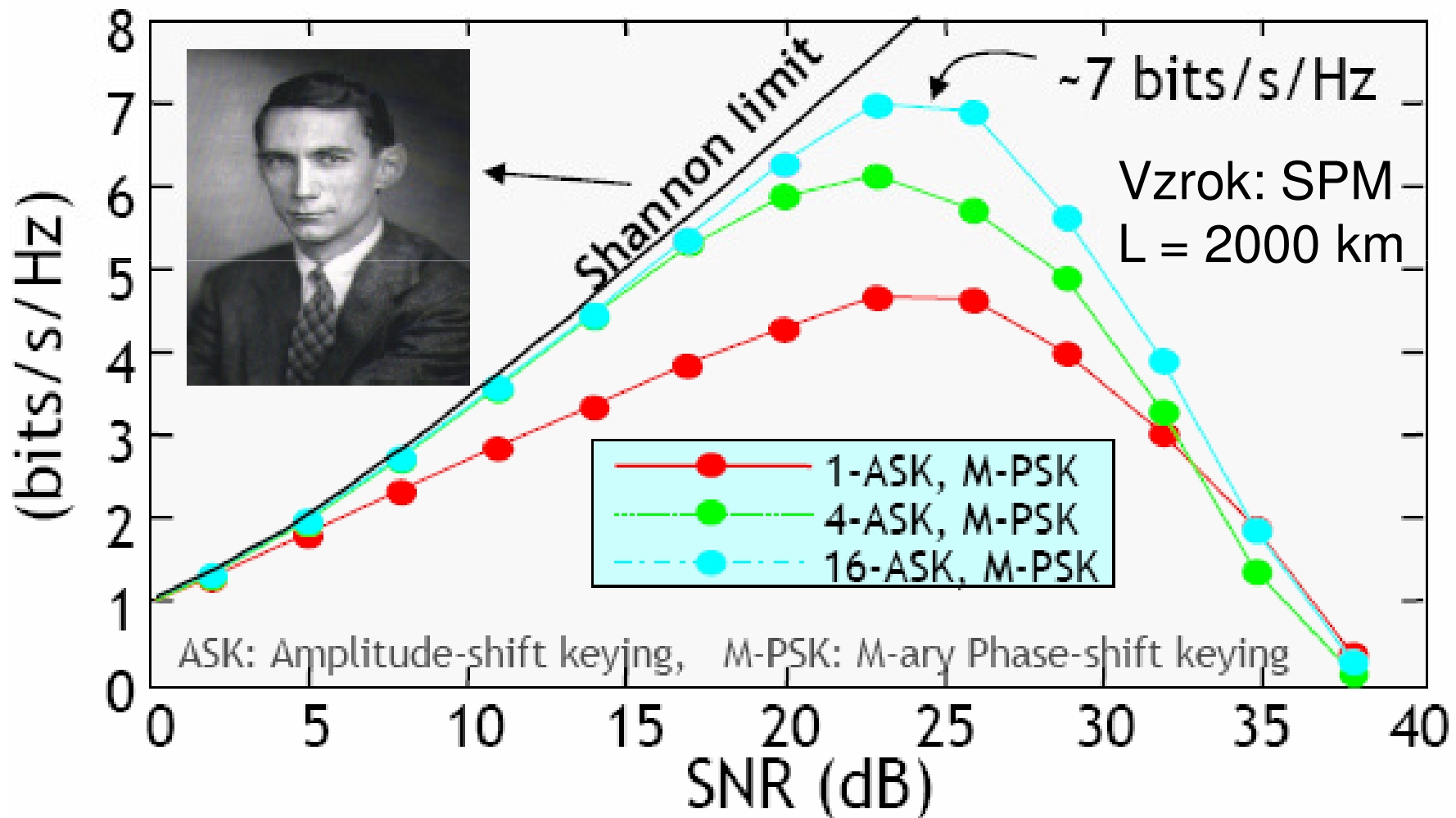
$$C = \Delta f \log_2 \left(1 + \frac{P}{N_0 \Delta f} \right)$$

Kapaciteta v optiki:

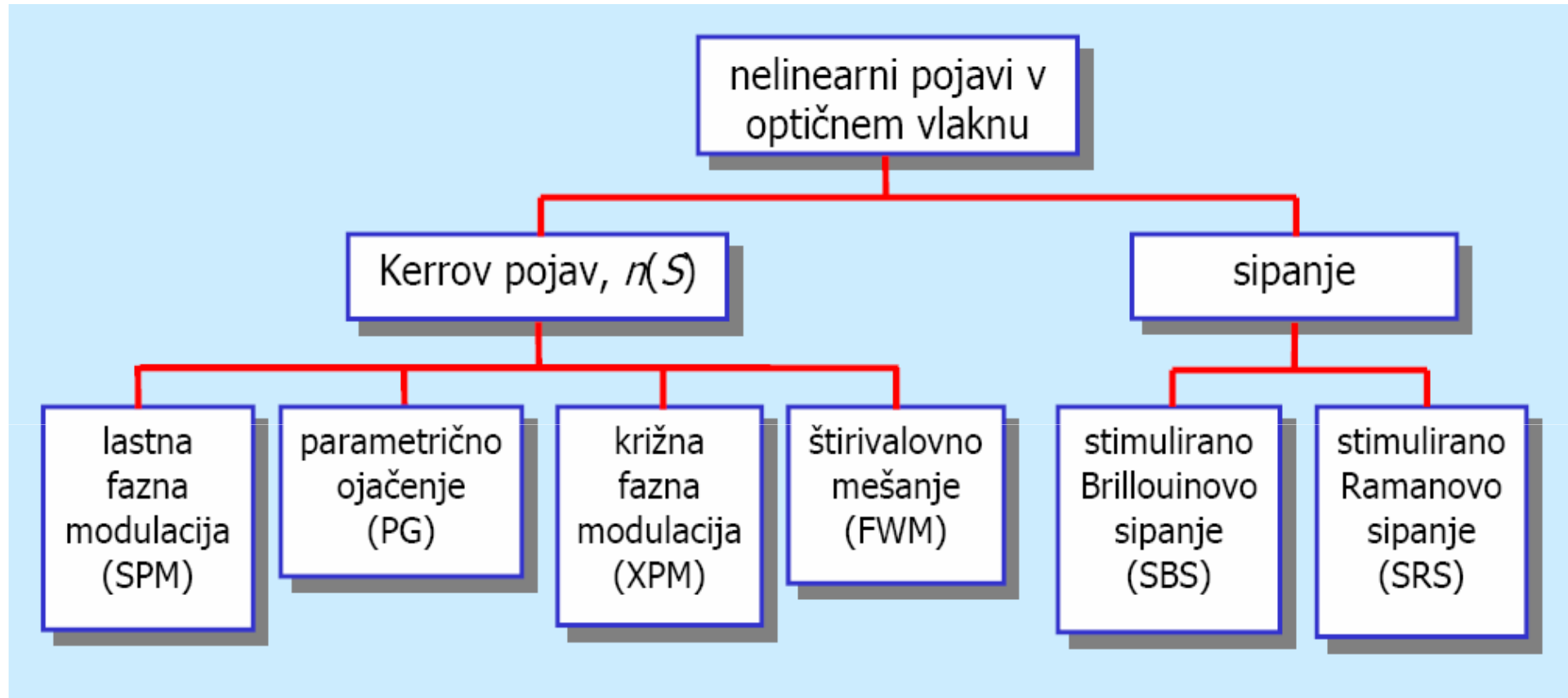
$$C_\infty = \frac{P}{N_0} \log_2 e$$

Shannonova meja v nelinearnem vlaknu

Spektralni izkoristek se zaradi pojava lastne fazne modulacije (SPM) v nelinearnem vlaknu zmanjšuje pri večji vrednosti razmerja S/N. Nelinearnost omejuje kapaciteto optičnega vlakna.



Vrste nelinearnih pojavov



Pomen nelinearnosti za temeljne lastnosti optičnega vlakna:

- škodljivi
- koristni

Pregled nelinearnih pojavov

A. Nelinearni pojavi v surovcu oz. prostoru (Gaussov snop)

B. Nelinearni pojavi v optičnem vlaknu (efektivna površina)

Zaradi majhne efektivne površine jedra in velike efektivne dolžine vlakna v primerjavi s prerezom Gaussovega snopa in njegovo fokusno dolžino je optično vlakno neprimerljivo bolj občutljivo na vzbujanje nelinearnih pojavov:

1. Nelinearni pojavi drugega reda ($P/\varepsilon_0 = \chi^{(1)}E + \chi^{(2)}EE$)

- Pockelsov linearni elektrooptični pojav

2. Nelinearni pojavi tretjega reda ($P/\varepsilon_0 = \chi^{(1)}E + \chi^{(2)}EE + \chi^{(3)}EEE$)

- **nelinearno sipanje** (razprševanje svetlobe, pri tem se spremeni valovna dolžina)

- Brillouinovo sipanje (interakcija svetlobe z akustičnimi fononi majhne energije - akustičnimi valovi)
- Ramanovo sipanje (interakcija svetlobe z optičnimi fononi velike energije - vibracijsko energijo molekul)

- **nelinearna refrakcija** (Kerrov pojav - lomni količnik n snovi sorazmeren svetlobni moči)

- lastna fazna modulacija (lasten val spreminja lomni količnik n snovi)
- prečna fazna modulacija (tuji val spreminja lomni količnik n snovi)
- štirivalovno mešanje (intermodulacija v nelinearni snovi)

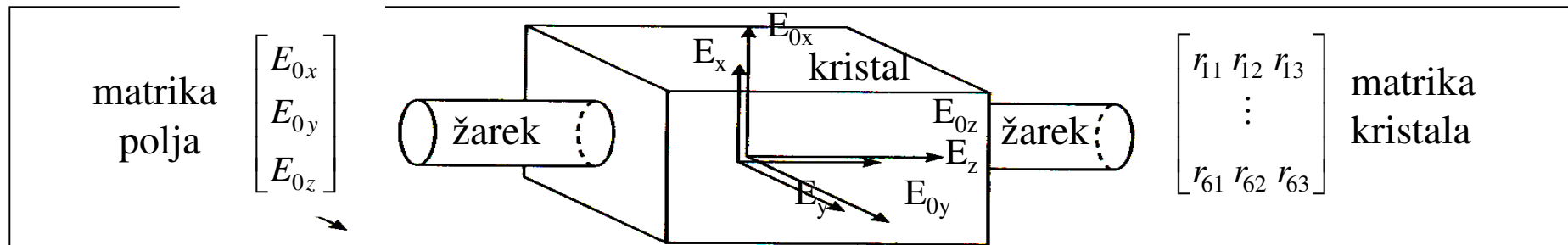
3. Drugi nelinearni pojavi

- fotorefrakcija in fotosenzitivnost (začasna ali trajna sprememba n svetlobe)
- fazna konjugacija (spektralna inverzija)
- elektroabsorpcija (spreminjanje absorpcije svetlobe z električnem poljem (pojav Franz -Keldysh))
- fotoelastičnost (spreminjanje n z mehanskimi napetostmi snovi)
- fotokonduktivnost (spreminjanje prevodnosti snovi s svetlobo)
- magnetooptični pojav (Faradayeva rotacija polarizacije)

Pockelsov elektrooptični pojav

Pod vplivom zunanjega električnega polja E se spremeni lomni količnik snovi:

Lomni količnik $n^2 = 1 + \chi^{(1)}E + \chi^{(2)}EE$ nelinearen pojav 2. reda



Recipročna vrednost kvadrata lomnega količnika pod vplivom polja $\left(\frac{1}{n^2}\right)'_i = \left(\frac{1}{n^2}\right)_i + \sum r_{ij}E_{0j}$

1. Kristal LiNbO3 ($r_{13} \neq 0, r_{33} \neq 0$)

Nevzbujeno stanje: $n_x = n_y = n_0 = 2,3$

$$n_z = n_e = 2,2$$

Vzbujeno stanje ($\vec{E} = \vec{I}_z E_{0z}$)

$$n'_x \doteq n'_y = n_0 - \frac{n_0^3}{2} r_{13} E_{0z}$$

$$n'_z \doteq n_e - \frac{n_e^3}{2} r_{33} E_{0z}$$

2. Kristal KDP ($r_{63} \neq 0$)

Nevzbujeno stanje: $n_x = n_y = n_0 = 1,5$

$$n_z = n_e = 1,47$$

Vzbujeno stanje ($\vec{E} = \vec{I}_z E_{0z}, r_{63} \neq 0$)

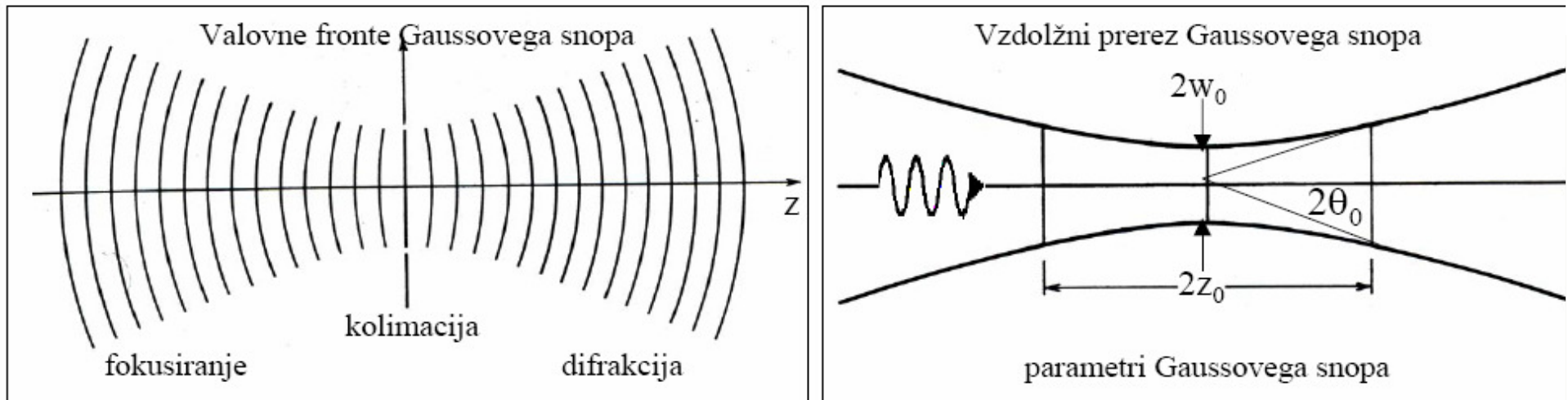
$$n'_x \doteq n_0 + \frac{n_0^3}{2} r_{63} E_{0z}$$

$$n'_y \doteq n_0 - \frac{n_0^3}{2} r_{63} E_{0z}$$

$$n'_z = n_e$$

Uporaba: amplitudna in fazna modulacija, fazni zakasnilnik, stikalo, interferometer

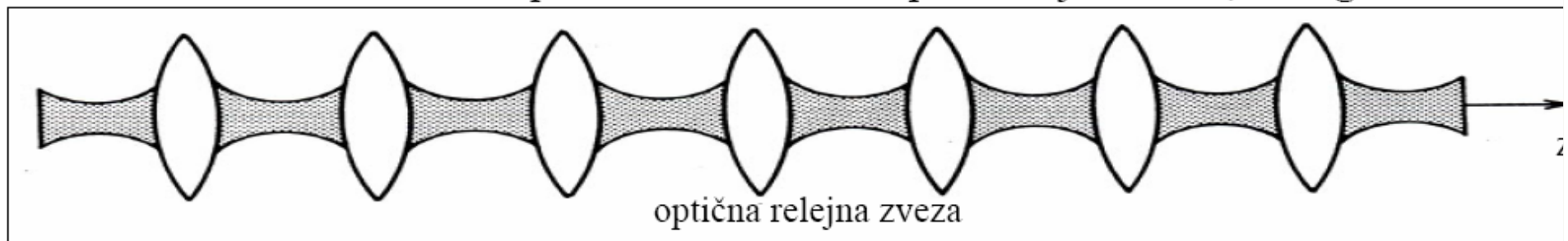
Gaussov snop



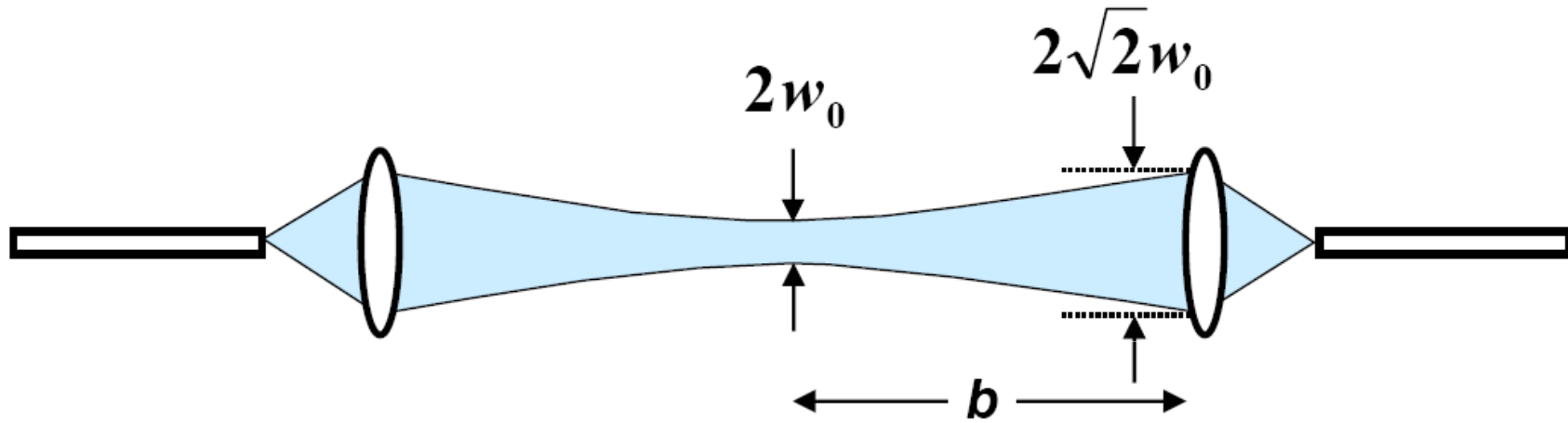
Optični žarek skozi homogeno snov ima pod vplivom fokusiranja in difrakcije področje konvergentnosti in divergentnosti. Val je TEM_{00}

Podatki:

$2\theta_0 = \frac{2}{\pi} \frac{\lambda}{w_0}$	vršni kot divergence žarka; konus zajema 86% moči
$2z_0 = \frac{2\pi w_0^2}{\lambda}$	dolžina (globina) fokusa
$2w_0 = 2\theta_0 z_0$	premer žarka v fokusu po kriteriju $1/e^2 = 0,14$ za gostoto moči



Gaussov snop - fokusiranje



$$w^2(z) = w_0^2 \left[1 + \left(\frac{z}{b} \right)^2 \right]$$

$$b = \frac{\pi w_0^2}{\lambda}$$

Nelinearni pojavi so bili odkriti razmeroma pozno. Kerr je nagrada, 1960, Bloembergen)

(Nobelova

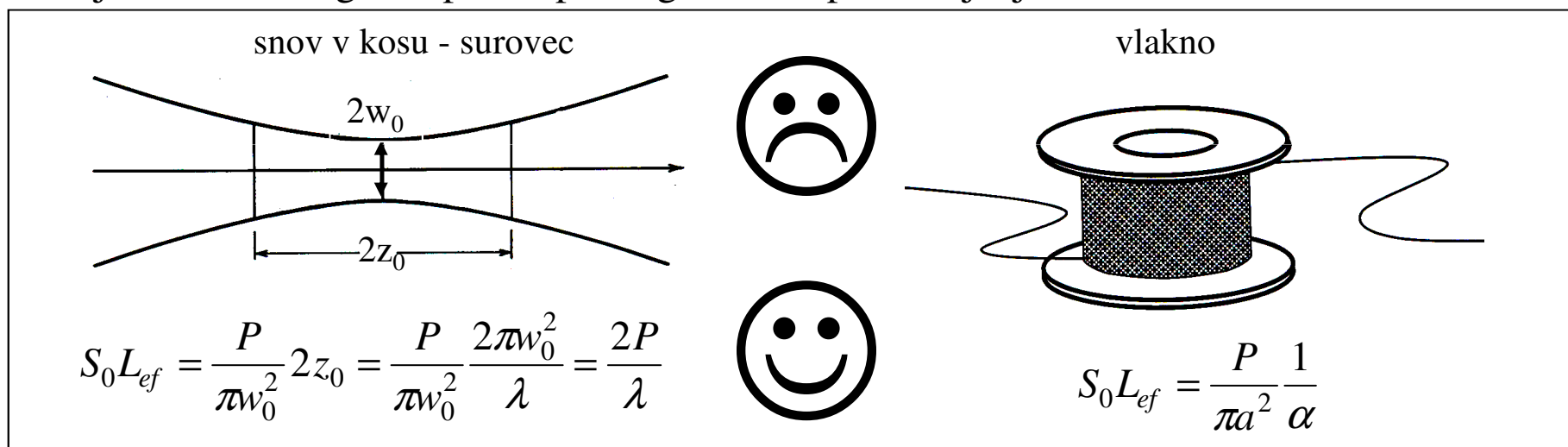
Nelinearna refrakcija (Kerrov pojav)

- Kerrov kvadratni pojav:**

$$n(\omega) = n_0(\omega) + n_2 S = n_0(\omega) + n_2 \frac{P}{A_{ef}}, \quad n_2 \doteq 2,6 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}, \quad A_{ef} = 50 - 80 \mu\text{m}^2$$

Zaradi majhne vrednosti nelinearnega dela lomnega količnika n_2 prihaja nelinearna refrakcija do izraza pri močeh $P > 10 \text{ mW}$ v optičnem vlaknu majhne ali običajne efektivne površine in velike efektivne dolžine (cca 20 km).

Primerjava Gaussovega snopa in optičnega vlakna pri vzbujujanju nelinearnosti v snovi:



- Razmerje:** $\frac{(S_0 L_{ef})_{vlakno}}{(S_0 L_{ef})_{Gaussov \ snop}} = \frac{\lambda}{2\pi a^2 \alpha} \doteq 10^9 !!$

Nelinearni pojavi v optičnem vlaknu so neprimerno bolj izraziti kot v homogeni snovi.

Podobno kot drugi nelinearni pojavi je tudi nelinearna refrakcija lahko škodljiva, lahko pa jo koristni uporabimo.

Nelinearni lomni količnik (Kerrov pojav)¹²

$$n = n_0 + n_2 I = n_0 + \left(\frac{n_2}{A_{\text{eff}}} \right) P$$

$n_0(\omega)$ je linearni del lomnega količnika, ki ni odvisen od moči. Odvisen je od frekvence in daje disperzijo.

$n_2 P / A_{\text{eff}} = n_2 S$ je nelinearni del lomnega količnika, ki je sorazmeren gostoti moči S v vlaknu

SiO₂: $n_2 = 2,6 \cdot 10^{-11} \text{ } \mu\text{m}^2/\text{mW}$

Glavni parametri nelinearnega vlakna

- **Efektivna dolžina** (effective length):

$$L_{ef} \text{ (km)} = \int_0^L e^{-\alpha l} dl = \frac{1}{\alpha} (1 - e^{-\alpha L}) \doteq \frac{1}{\alpha} = \frac{4,343}{\alpha \text{ (dB/km)}} \quad L_{ef} \doteq 20 \text{ km}$$

kjer je α koeficient slabljenja vlakna.

- **Efektivna površina** (effective area):

$$A_{ef} \text{ (}\mu\text{m}^2\text{)} = 2\pi \frac{\left(\int_A |E|^2 r dr \right)^2}{\int_A |E|^4 r dr} \quad A_{ef} = 60 - 80 \mu\text{m}^2$$

kjer je $E(r)$ porazdelitev polja po prečnem prerezu vlakna.

- **Nelinearni koeficient** (non - linear coefficient):

$$\gamma \text{ (W}^{-1}\text{km}^{-1}\text{)} = \frac{2\pi}{\lambda_0} \frac{n_2}{A_{ef}} \quad \gamma \doteq 2,7 \text{ (Wkm)}^{-1}$$

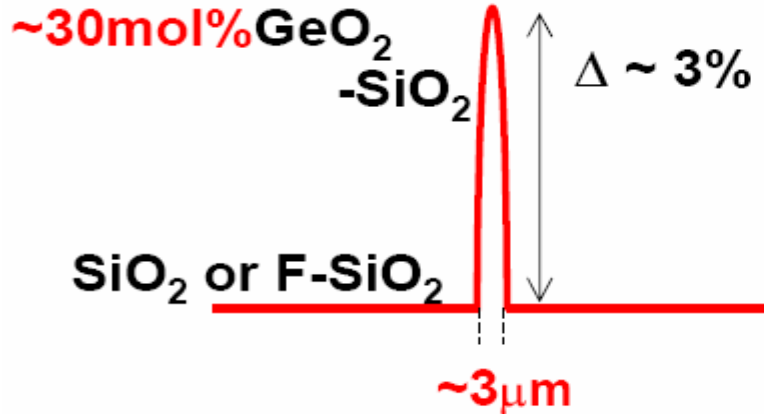
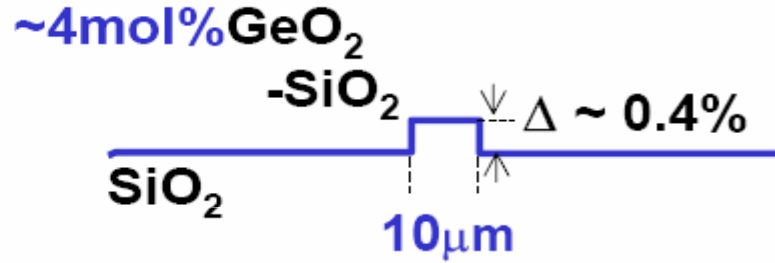
kjer je n_2 Kerrov koeficient nelinearne refrakcije.

- **Ojačevalni koeficient stimuliranega sipanja** (gain coefficient of stimulated (Raman, Brillouin) scattering):

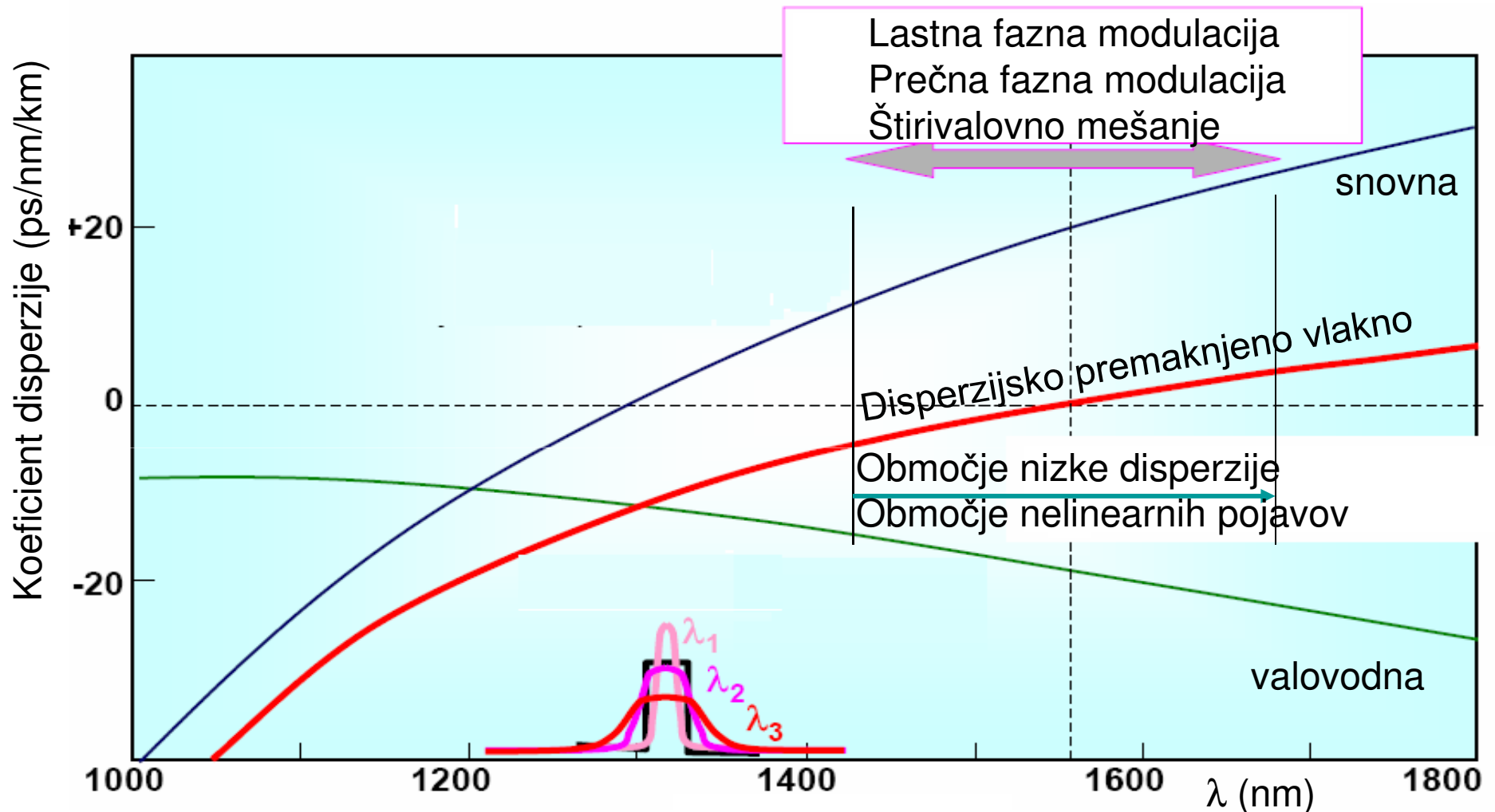
$$g \text{ (mW}^{-1}\text{)} = \frac{A_{ef}}{P_s P_c} \frac{dP_s}{dz} \quad g_R \doteq 10^{-13} \text{ m/W}$$
$$g_R \doteq 5 \cdot 10^{-11} \text{ m/W}$$

kjer je P_s moč signala in P_c moč črpalke.

Primerjava lin. in nelin. vlakna

	Visoko nelinearno vlakno	Standardno vlakno
	HNLF	SMF
	 <p>~30mol% GeO₂ -SiO₂ Δ ~ 3% SiO₂ or F-SiO₂ ~3μm</p>	 <p>~4mol% GeO₂ -SiO₂ Δ ~ 0.4% SiO₂ 10μm</p>
Nelinearni količnik n_2	4~6 [x 10 ⁻²⁰ m ² /W]	3 [x 10 ⁻²⁰ m ² /W]
Efektivna površina	9~20 [μm ²]	80 [μm ²]
Nelinearni koeficient γ	10~30 [/W/km]	1.5 [/W/km]
Slabljenje pri 1550 nm	0.5~1 [dB/km]	0.2 [dB/km]
λ nične disperzije	> 1350 [nm]	1310 [nm]

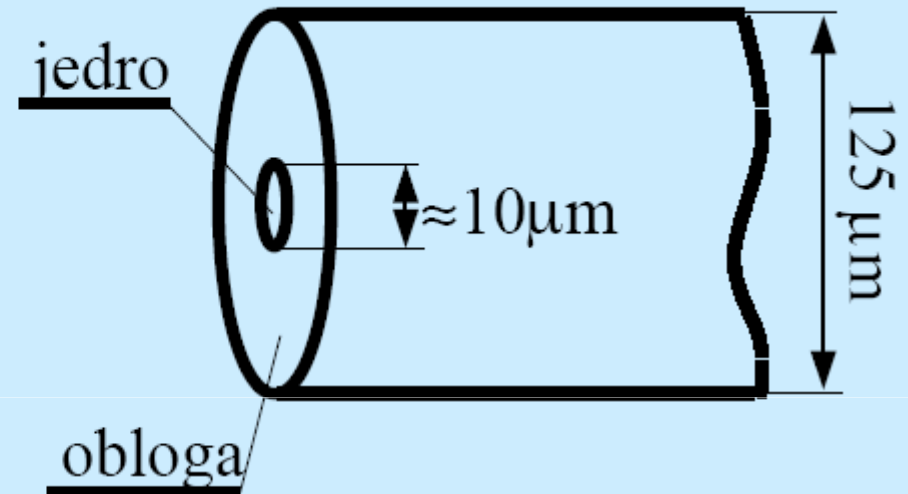
Disperzija in nelinearnost



V odsotnosti disperzije se lahko pri moči $P > 10 \text{ mW}$ pojavijo nelinearni pojavi. Nelinearnost je največja omejitev optičnega vlakna. Disperzija in nelinearnost imata nasprotne učinke, zato ju je mogoče medsebojno kompenzirati. Vlakno brez disperzije je za prenos neuporabno. Običajno je $D = 4, 8$ ali 17 ps/nm/km .

Efektivna površina vlakna in njen pomen

$$A_{eff} = \frac{2\pi \left(\int_0^{\infty} |F(r)|^2 r dr \right)^2}{\int_0^{\infty} |F(r)|^4 r dr}$$

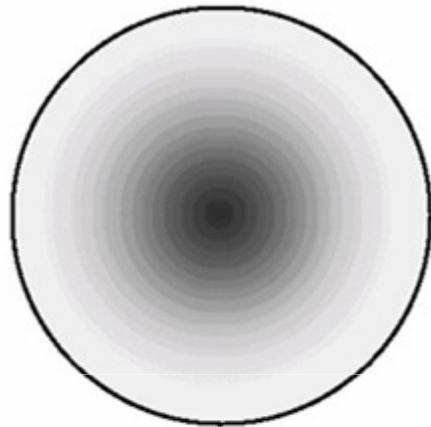


	Effective area (μm ²)	MFD (μm)
SMF G652	80	10.5
NZDSF G655 (LEA)	72	9.4
NZDSF G655 (RS)	52	8.3

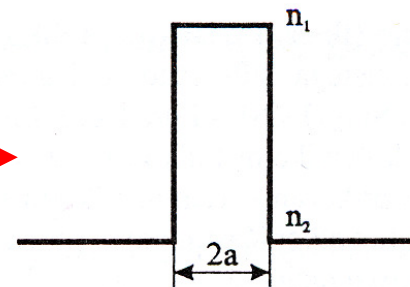
Večje vrednosti efektivne površine dosežemo pri mikrostrukturiranih vlaknih.

Primerjava vlaken SSMF in LEAF

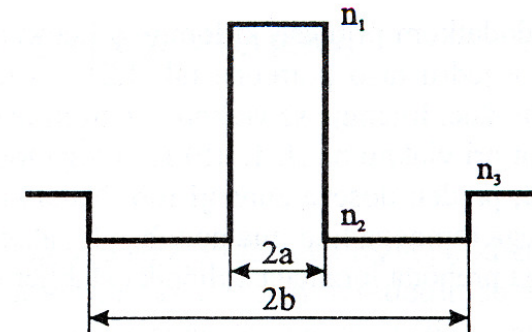
Vlakno SSMF



Lomni lik impulzne oblike

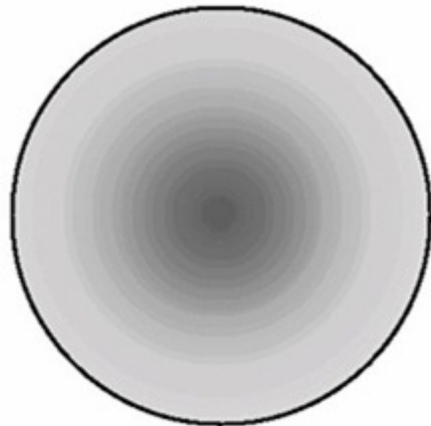


(a)

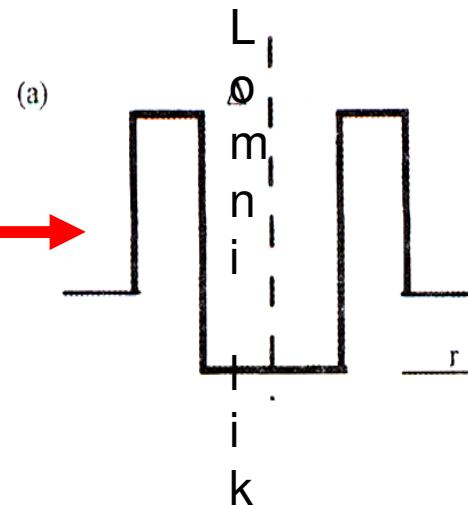


(b)

Vlakno LEAF

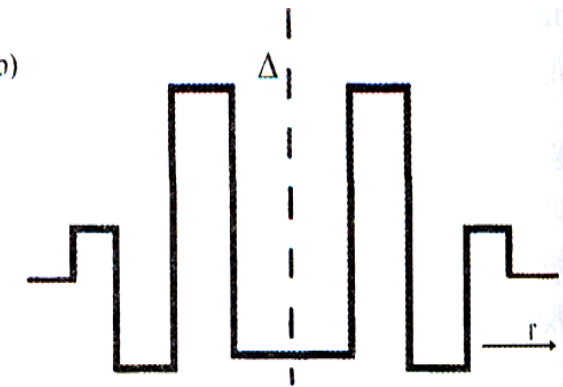


Lomni lik cevaste oblike



(a)

(b)



Efektivna dolžina

$$L_{eff} = \frac{1 - e^{-\alpha L}}{\alpha}$$

Definicija je pomembna za nelinearne pojave in optično porazdeljeno ojačevanje

$$P(z) = P e^{-\alpha z}$$

$$PL_{ef} = \int_{z=0}^L P(z) dz$$

$$L_{ef} = \frac{1 - e^{-\alpha L}}{\alpha}$$

Porabljena (eksponentno upadajoča) moč na celotni dolžini L vlakna je ekvivalentna porabljeni (neupadajoči) moči na efektivni dolžini $L_{ef} = 1/\alpha$.

$$\alpha_{dB} = 0,22 \text{ dB/km} \quad \text{pri } \lambda = 1550 \text{ nm}$$

Pri $L \gg 1/\alpha$ je L_{ef} približno 20 km

Nelinearni koeficient

$$\gamma = \frac{2\pi n_2}{\lambda A_{eff}}$$

Valovna konstanta ima linearni del, odvisen od frekvence, ter nelinearni del, odvisen od valovne dolžine in sorazmeren moči P :

$$\beta_{NL} = \beta + \gamma P$$

Nelinearna refrakcija – Kerrov pojav ²⁰

1. Lastna fazna modulacija

Modulacija faze signala zaradi intenzitetne modulacije lomnega količnika vlakna, ki jo pri širjenju povzroča signal sam (frekvenčni žvižg v impulzu).

2. Prečna fazna modulacija

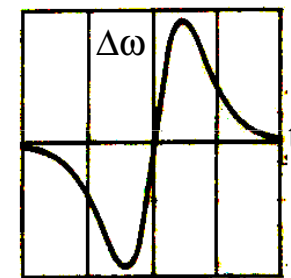
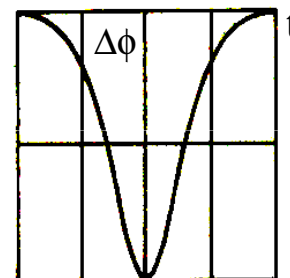
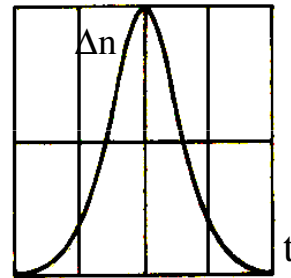
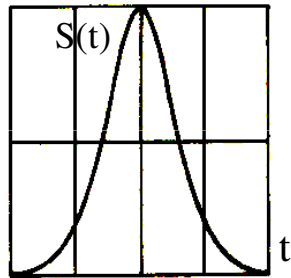
Modulacija faze signala zaradi intenzitetne modulacije lomnega količnika vlakna, ki jo povzročajo signali drugih motilnih kanalov.

3. Štirivalovno mešanje (intermodulacija)

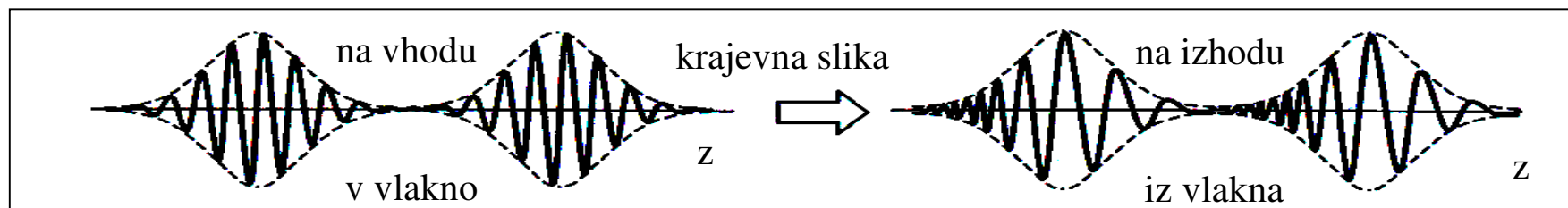
Presluh med sosednimi kanali zaradi generacije novih frekvenc v nelinearnem vlaknu.

Lastna fazna modulacija

- **Vzrok:** nelinearna odvisnost lomnega količnika od gostote moči (Kerrov pojav)
- **Pojav:** notranja fazna in frekvenčna modulacija pri širjenju impulza v vlaknu dolžine L
 - signal $s(z,t) = A(z,t)\cos(\omega t - \beta z)$
 - lomni količnik $n(z,t) = n_0 + n_2 S(z,t)$
 - sprememba faze $\Delta\phi(z,t) = -\frac{2\pi}{\lambda} n_2 L S(z,t)$
 - sprememba ω $\Delta\omega(z,t) = -\frac{2\pi}{\lambda} n_2 L \frac{dS(z,t)}{dt}$
 - gostota moči $S(z,t) \propto |A(z,t)|^2 / Z$
 - sprememba n $\Delta n(z,t) = n_2 S(z,t)$
 - frekvenca $\omega(z,t) = \frac{d\phi(z,t)}{dt}$



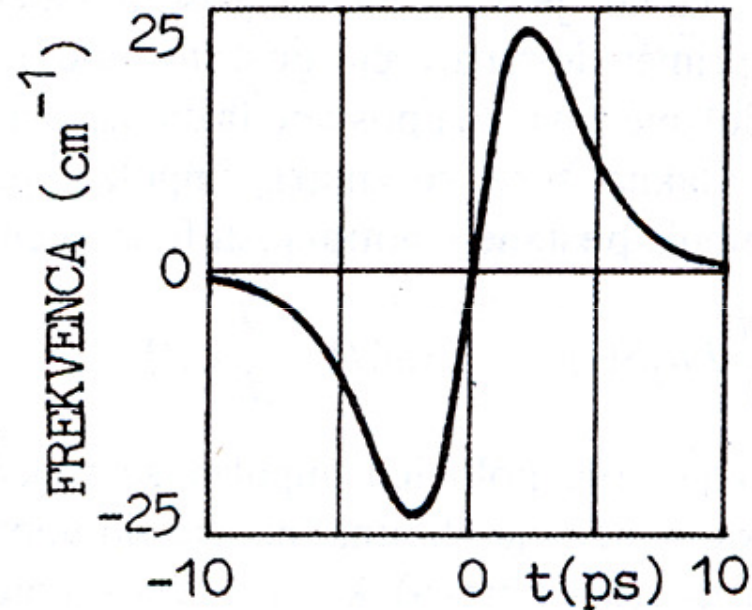
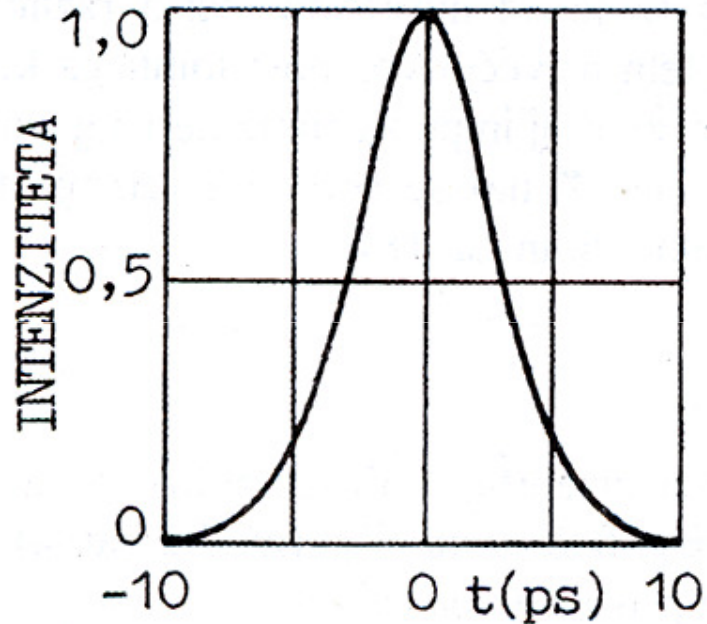
- **Posledice:**
 - povečanje spektralne širine impulza ob nespremenjeni ovojnici
 - nižje frekvence na čelu, višje frekvence na začelju impulza
 - razširitev ali zožitev ovojnice impulza pri širjenju po disperznem vlaknu negativne ali pozitivne disperzije ($D \leftrightarrow 0$), učinek navidezne negativne disperzije ($D < 0$) in možnost kompenzacije pozitivne disperzije D vlakna - primer solitonov.



Nelinearna modulacija v vlaknu

Intenziteta \rightarrow lomni količnik \rightarrow faza \rightarrow frekvenca

- Lastna fazna modulacija

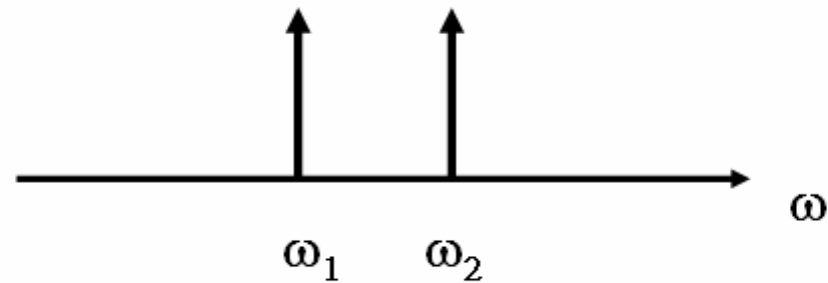


$$\Delta\Phi(t) = -\frac{2\pi}{\lambda}L\Delta n(t) = -\frac{2\pi}{\lambda}Ln_2S(t). \quad \Delta\omega(t) = \frac{d}{dt}\Delta\Phi(t) = -\frac{2\pi}{\lambda}Ln_2\frac{d}{dt}S(t).$$

Nelinearnost povzroča notranjo frekvenčno modulacijo znotraj impulza. Sredi impulza se frekvenca spreminja linearno. V čelnem delu impulza (glede na smer širjenja) se frekvenca zviša, v začetnem delu impulza se frekvenca zniža.

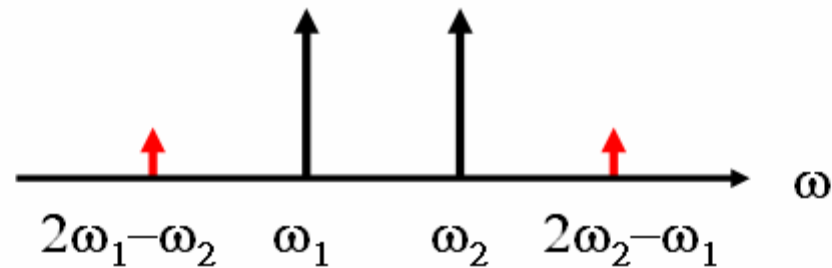
Mešanje

Vhod v vlakno

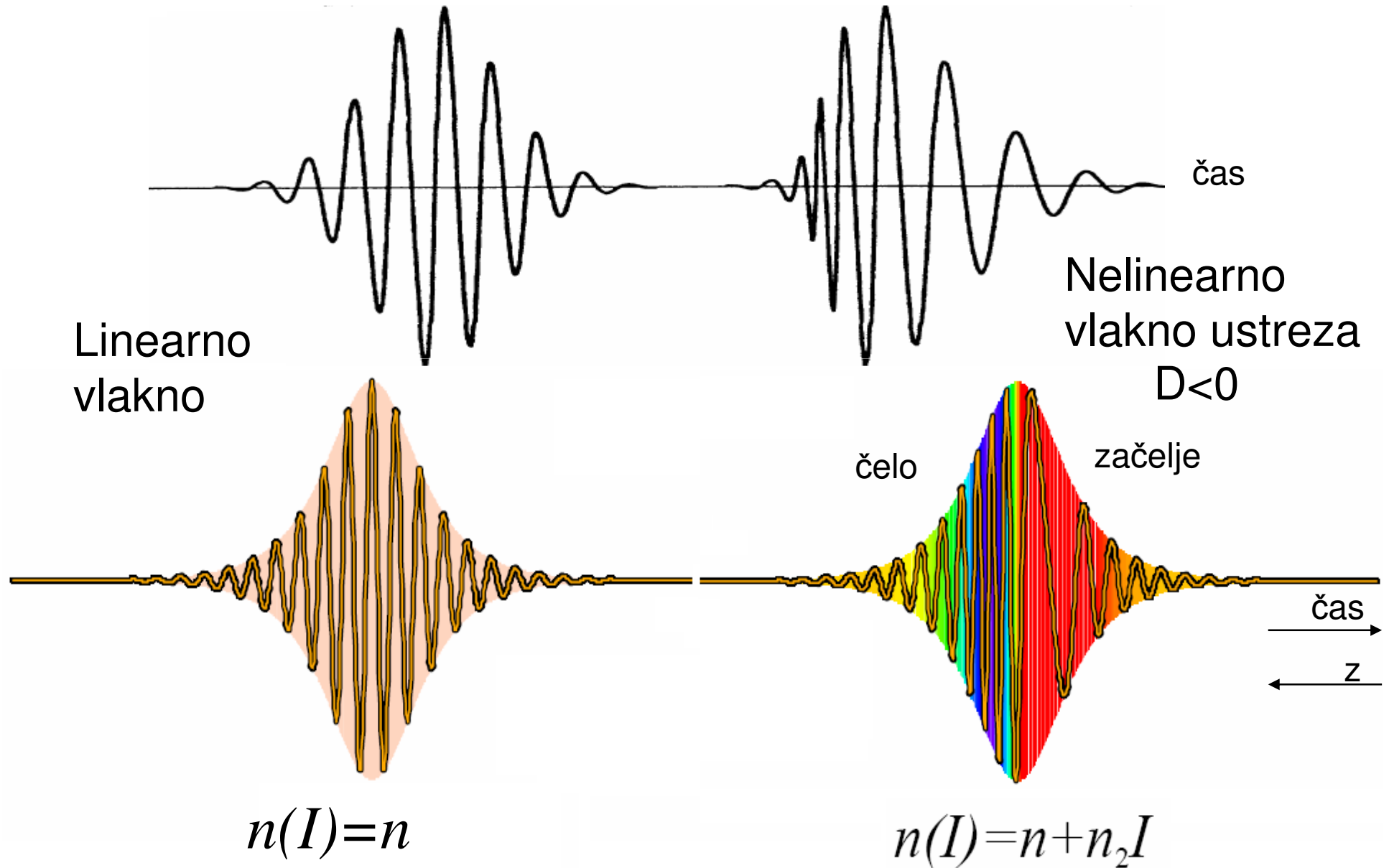


$$n = n_0 + n_2 [E_1^2 + E_2^2 + 2E_1 E_2 \cos(\omega_1 - \omega_2)t]$$

Izhod iz vlakna

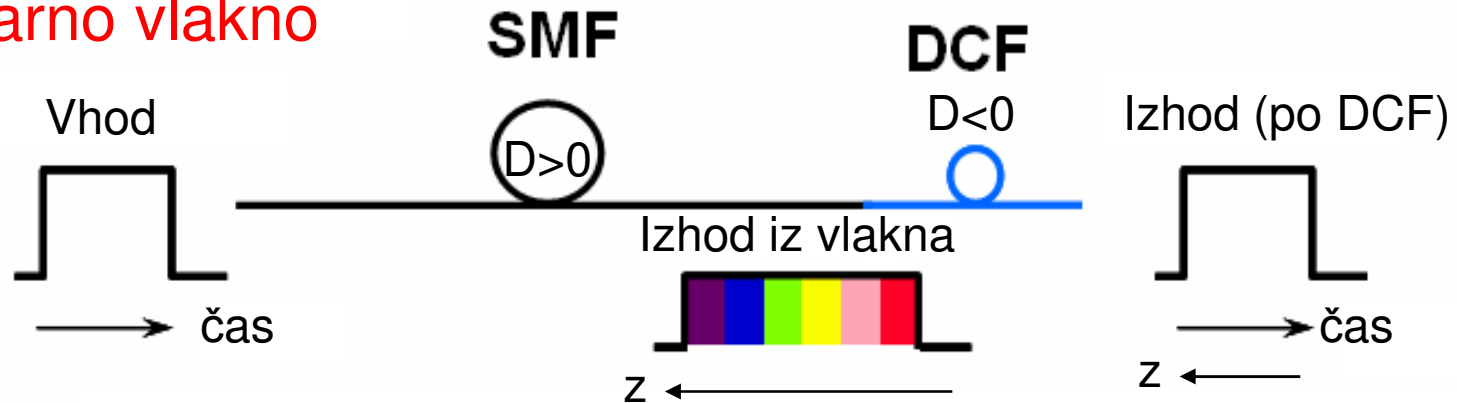


Lastna fazna modulacija

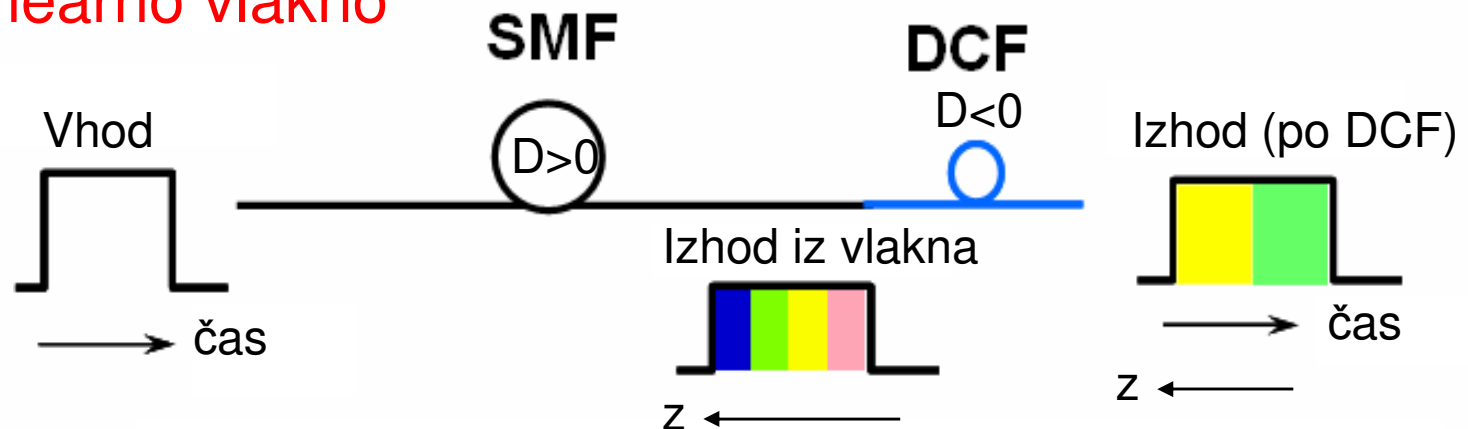


Disperzija in lastna fazna modulacija

- Linearno vlakno



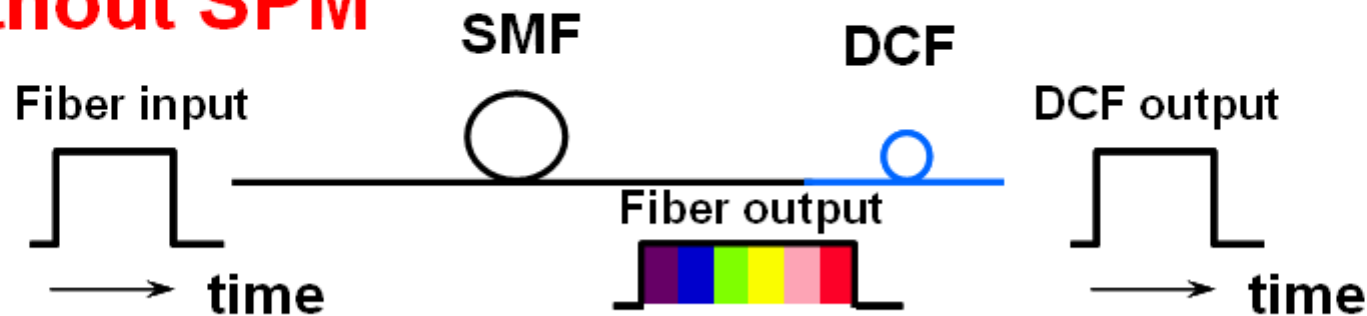
- Nelinearno vlakno



Nelinearnost s svojo navidezno negativno disperzijo nekoliko znižuje skupno pozitivno disperzijo na koncu vlakna. Po kompenzaciji ostane nekaj negativne D .

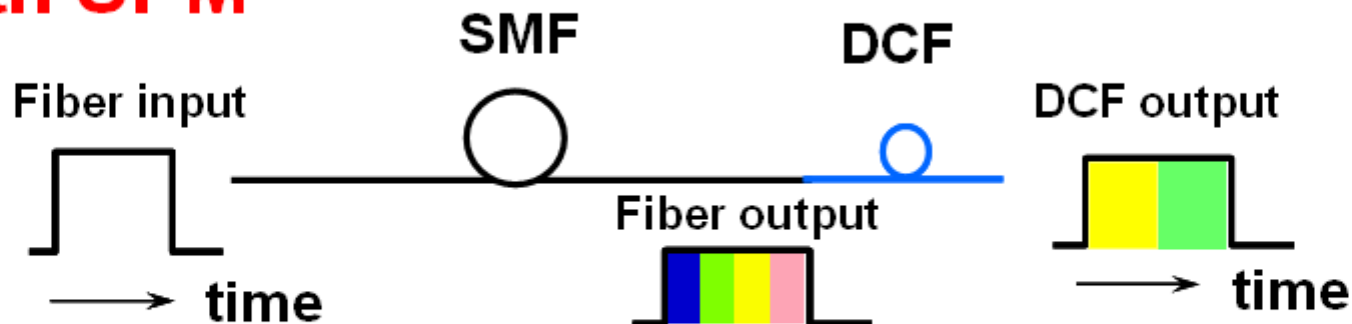
SPM and Dispersion Compensation

- **without SPM**



- Dispersion induces negative chirp
- **Exact compensation of chromatic dispersion**

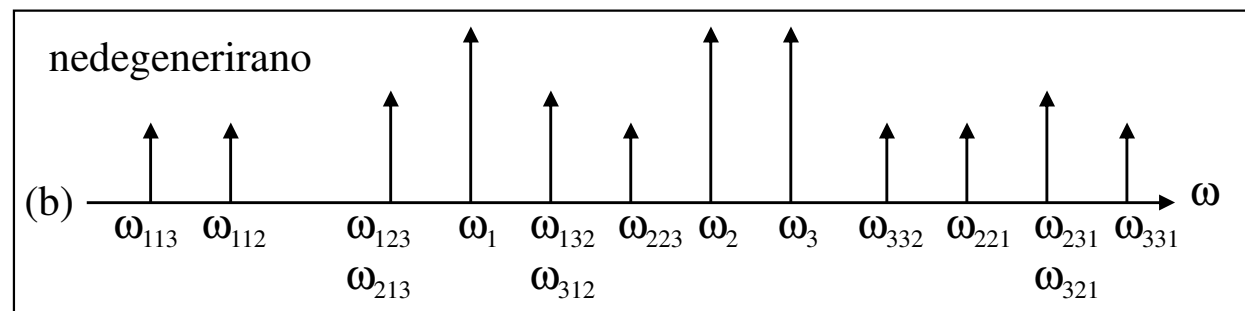
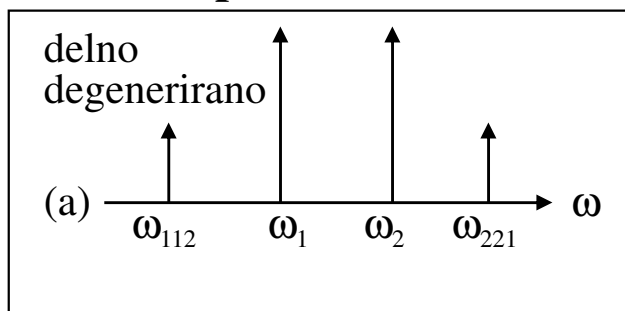
- **with SPM**



- SPM induces positive chirp decreases dispersion induced chirp.
- **DCF output has a residual positive chirp.**

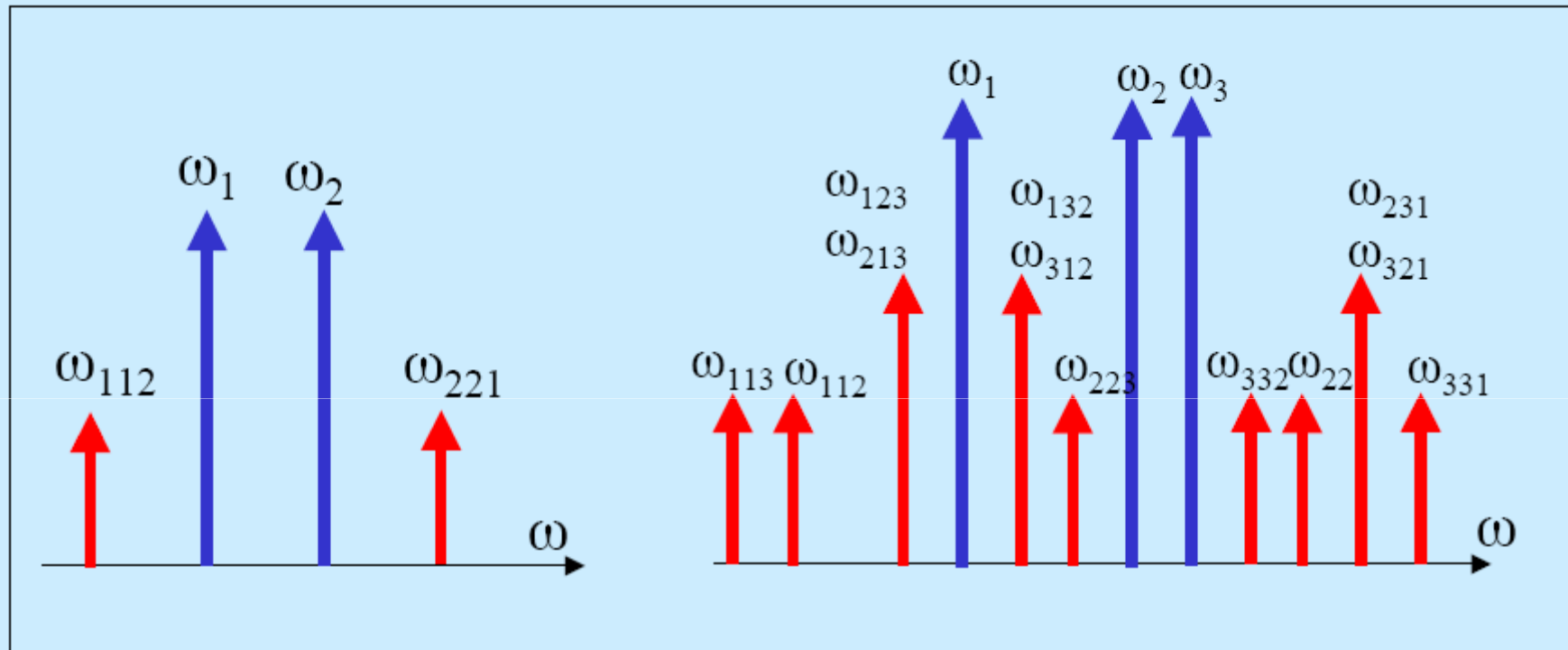
Štirivalovno mešanje (intermodulacija)

- **Vzrok:** nelinearna odvisnost lomnega količnika od gostote moči (Kerrov pojav)
- **Pojav:** generacija kombinacijskih frekvenc. Nastanek nove frekvence ω_{ijk} v prisotnosti frekvenc ω_i , ω_j in ω_k
- **Pogoji generacije:**
 - ohranitev energije (frekvenčna prilagojenost) $\omega_{ijk} = \omega_i + \omega_j - \omega_k$
 - ohranitev gibalne količine (fazna usklajenost) $\beta_{ijk} = \beta_i + \beta_j - \beta_k$
(valovi se širijo istosmerno, zato je zapis enačbe skalaren)
- **Vrste:**
 - degenerirano 4 - valovno mešanje $\omega_1 = \omega_2 = \omega_3 = \omega_4$
 - delno degenerirano 4 - valovno mešanje $\omega_1, \omega_2 = \omega_3, \omega_4$
 - nedegenerirano 4 - valovno mešanje $\omega_1 \neq \omega_2 \neq \omega_3 \neq \omega_4$
- **Mešalni produkti:**



- **Posledice:**
 - sklop med kanali WDM, presluh in motnja
 - število novih mešalnih produktov pri N kanalih $n = (N^3 - N_2)/2$
- **Preprečevanje:** Dovolj velika fazna neprilagojenost $\Delta\beta = \beta_i + \beta_j - \beta_k - \beta_{ijk}$, ki jo dosegamo z disperzijo D in disperzijsko strmino S vlakna.

Primer intermodulacije



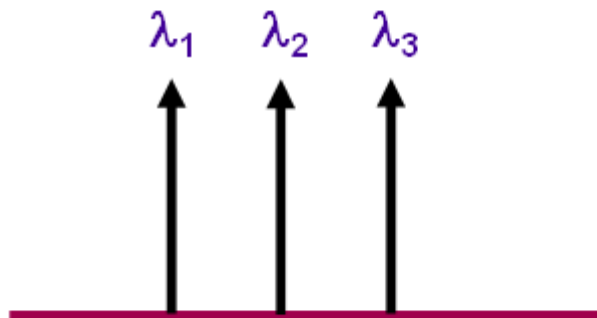
dva vhodna signala

tri je vhodni signali

$$\omega_{ijk} = \omega_i + \omega_j - \omega_k$$

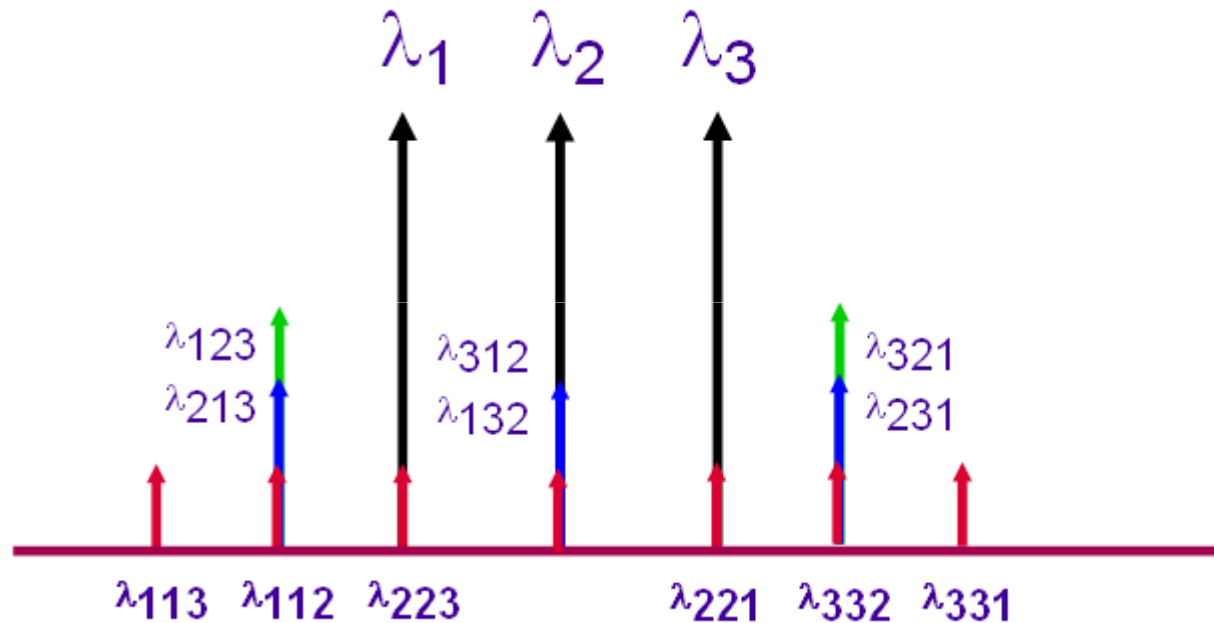
Štirivalovno mešanje - intermodulacija²⁹

Tri valovne dolžine
na vходу vlakna



Enakomerna porazdelitev
vhodnih valovnih dolžin

Valovni produkti na izhodu
iz nelinearnega vlakna



Izmed 12 novih valovnih dolžin so 4 take, da
se prekrivajo z vhodnimi valovnimi dolžinami

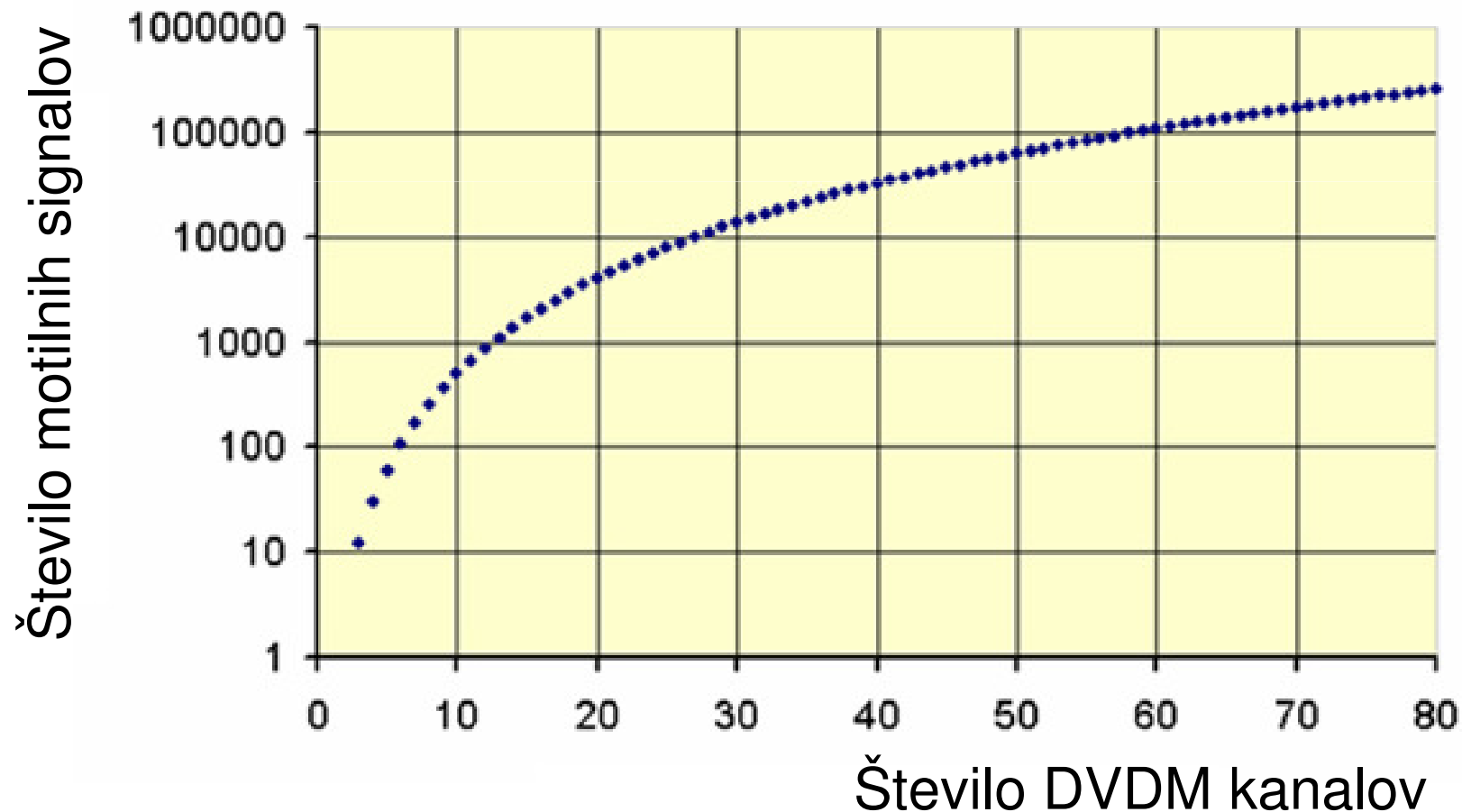
Število motilnih signalov

Primer: 3 kanali povzročajo 12 motilnih signalov.

M število motilnih signalov

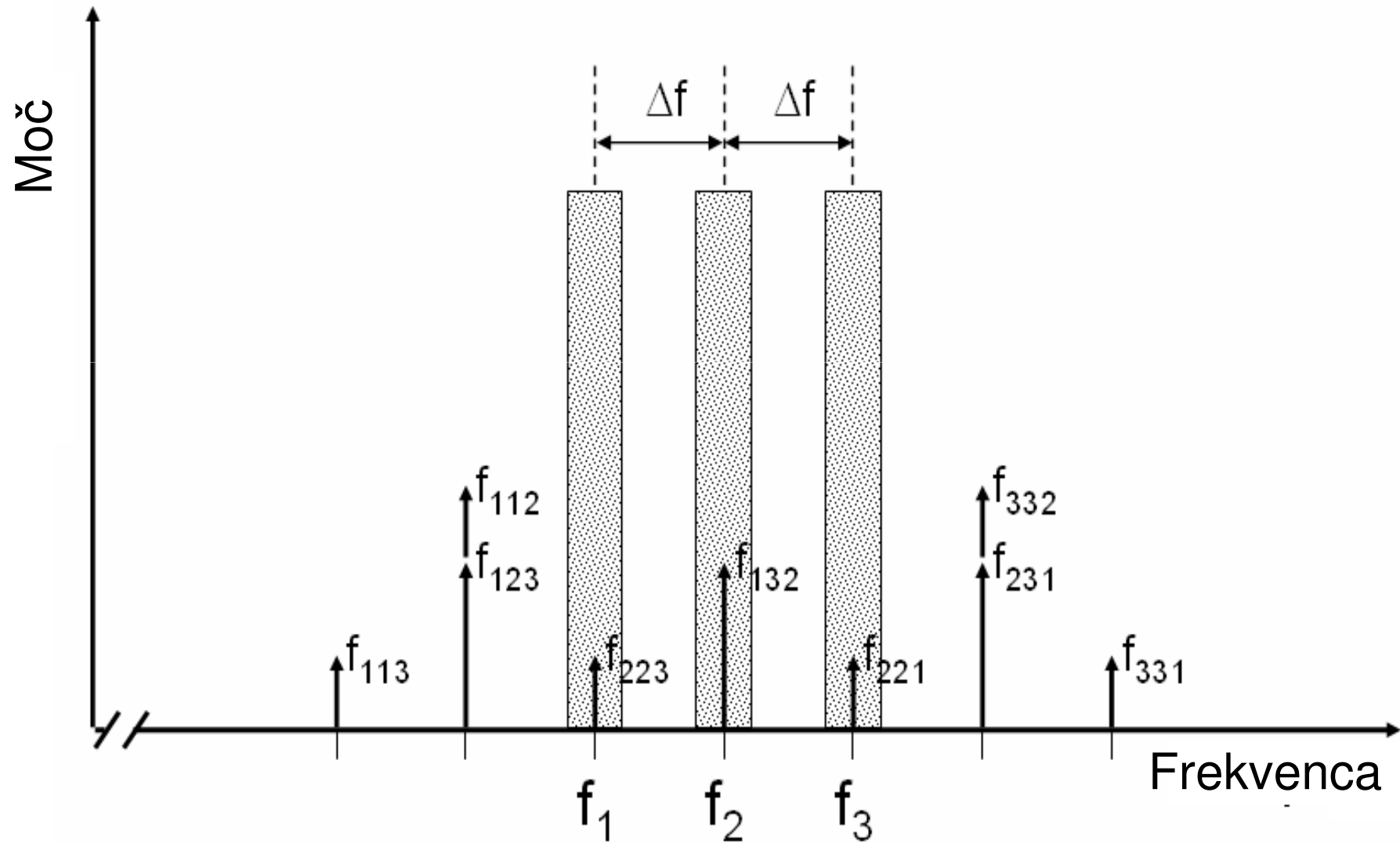
$$M = \frac{1}{2} (N^3 - N)$$

N število DWDM kanalov



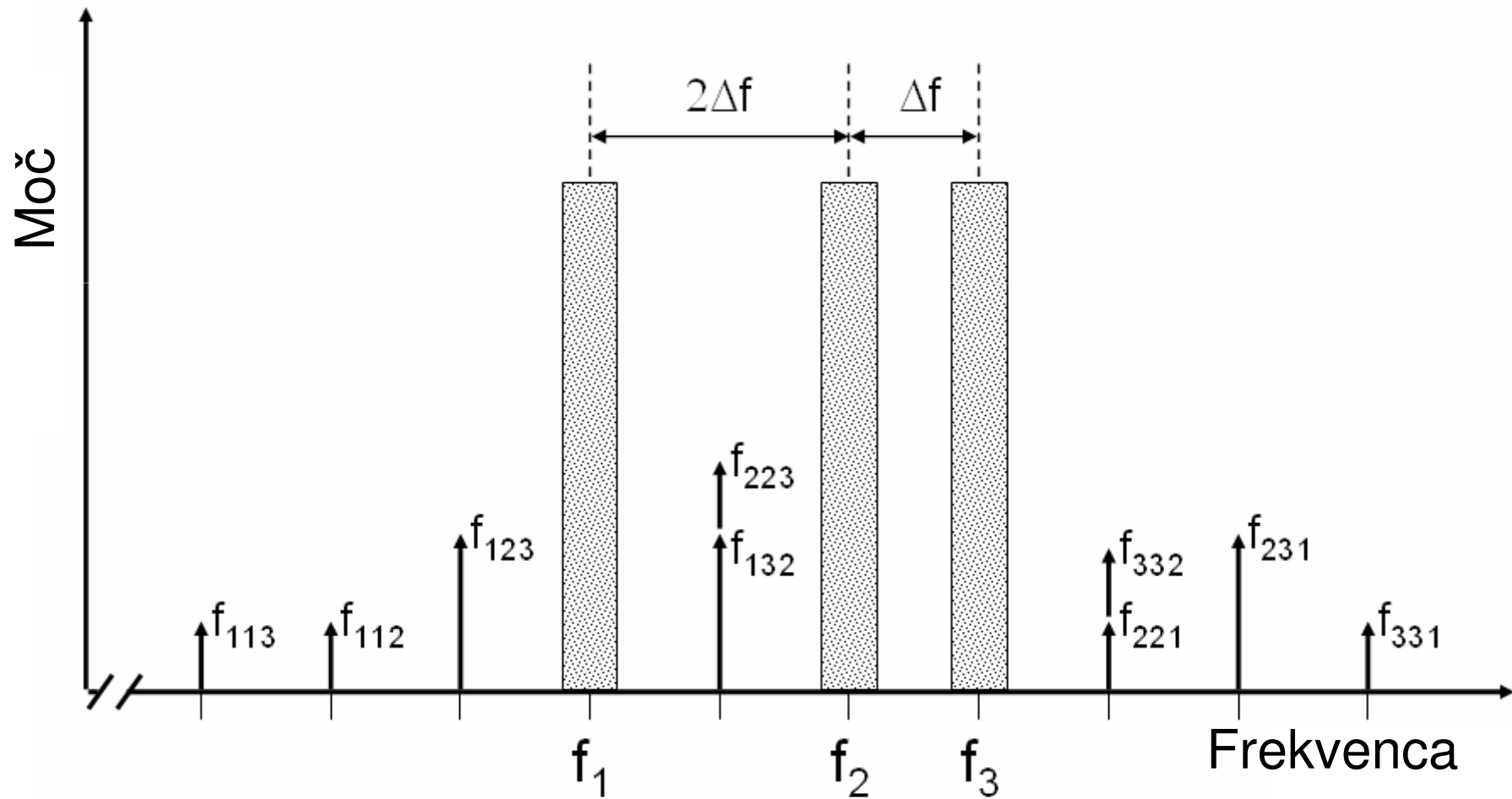
Primer intermodulacije

Od devetih mešalnih produktov padejo trije v kanale in povzročajo motnjo.



Primer intermodulacije

Od devetih mešalnih produktov ne pade nobeden v kanale, zato motenj ni.



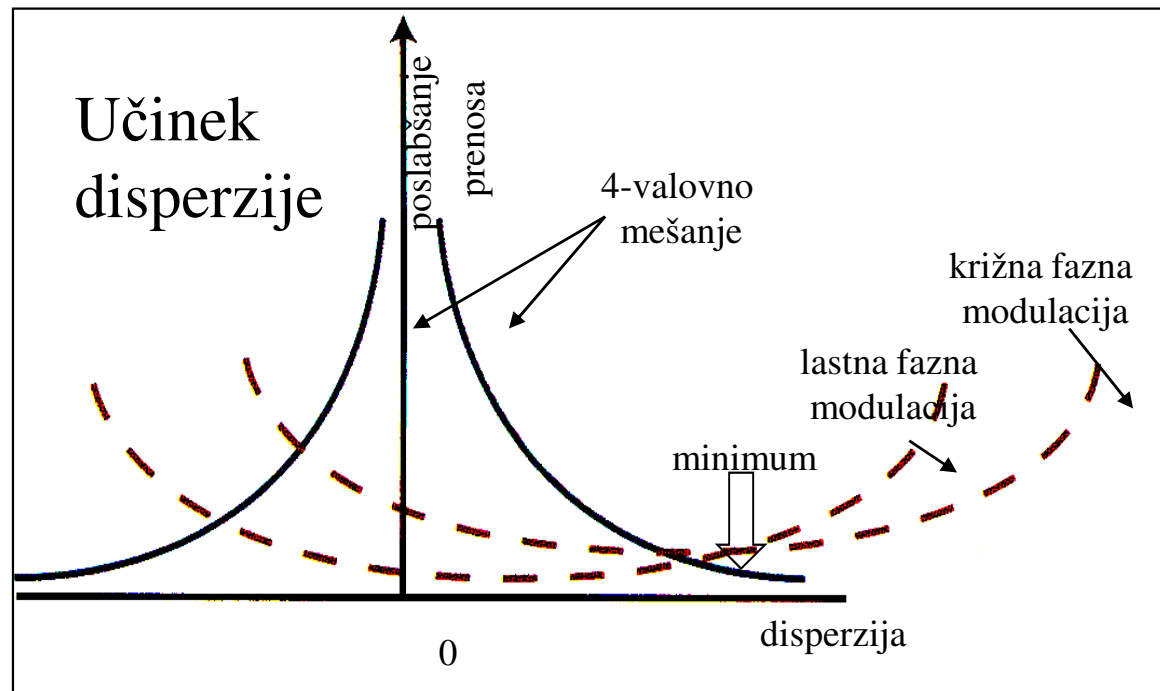
Štirivalovno mešanje

- **Valovna razlaga pojava** (nedegenerirano štirivalovno mešanje)
 - po dve in dve frekvenci časovno utripata s frekvenco $\omega_i - \omega_j$
 - časovni utrip se pri širjenju vala kaže kot krajevni utrip polja vzdolž vlakna
 - v nelinearnem mediju se lomni količnik modulira sorazmerno gostoti moči utripa v obliki uklonske mrežice
 - na njej se val tretje frekvence ω_k šibko fazno modulira
 - spekter šibko fazno moduliranega vala frekvence ω_k pridobi nasprotno ležeči bočni frekvenci $\omega_k \pm (\omega_i - \omega_j)$, kar razloži nastanek mešalnega produkta
- **Moč mešalnega produkta** (pri fazno neuskklajenih kanalih)

$$P_{ijk} \propto P^3 \frac{\alpha^2}{\Delta\beta^2}$$

$$\Delta\beta = \frac{2\pi\lambda^2}{c} (\Delta\nu)^2 \left(D + \Delta\nu \frac{2\lambda^2}{c} \frac{dD}{d\lambda} \right)$$

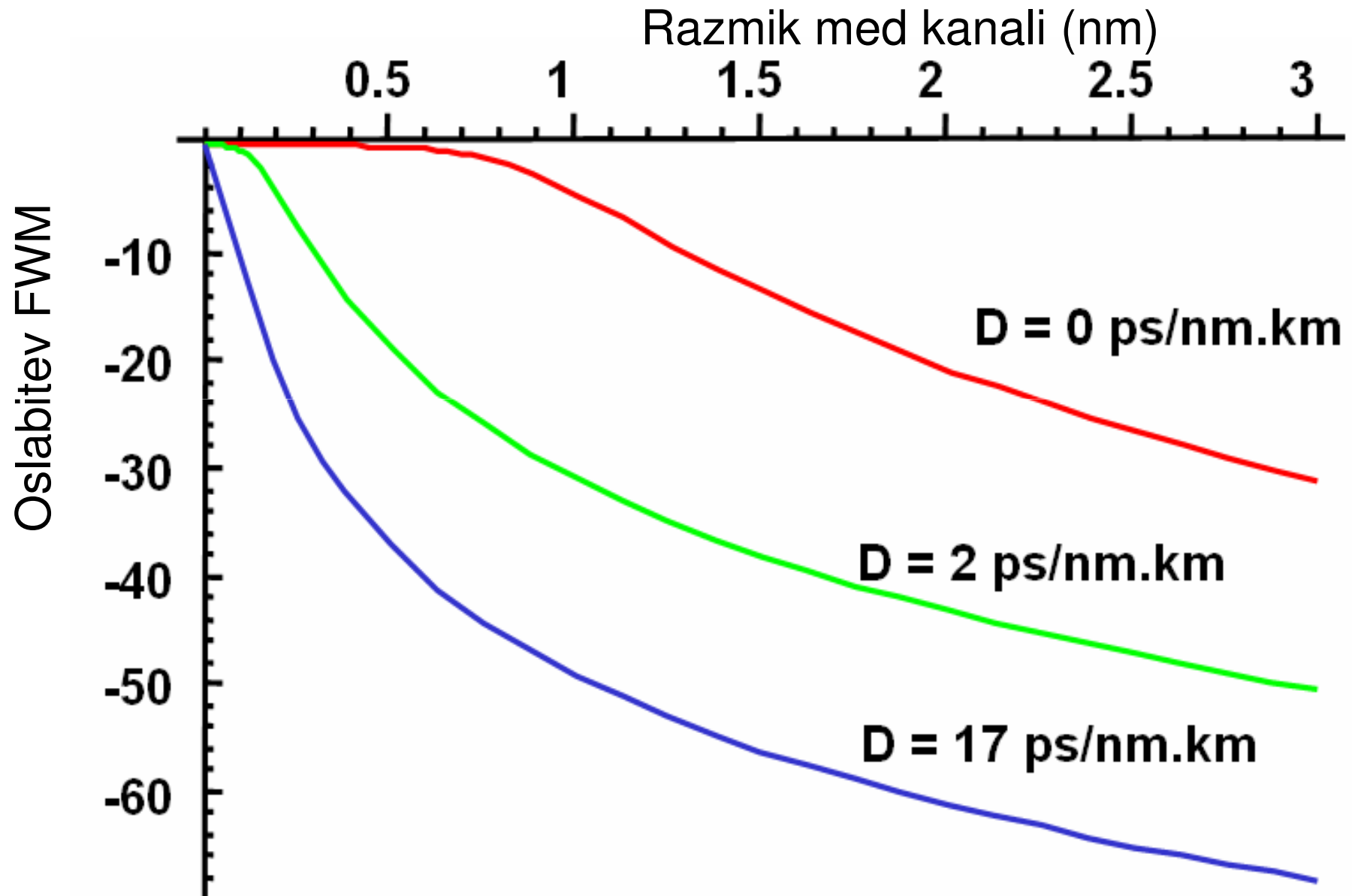
$$P_{ijk} \propto \frac{P^3}{(\Delta\nu)^4 D^2}$$



Suppression of FWM

- Minimization of effects
 - decrease power
 - increase channel spacing
 - Limited by EDFA gain bandwidth
 - unequal spacing
 - the power depletion is not compensated
 - dispersion management
 - G.655 fiber
 - +/- dispersion
 - spectral inversion

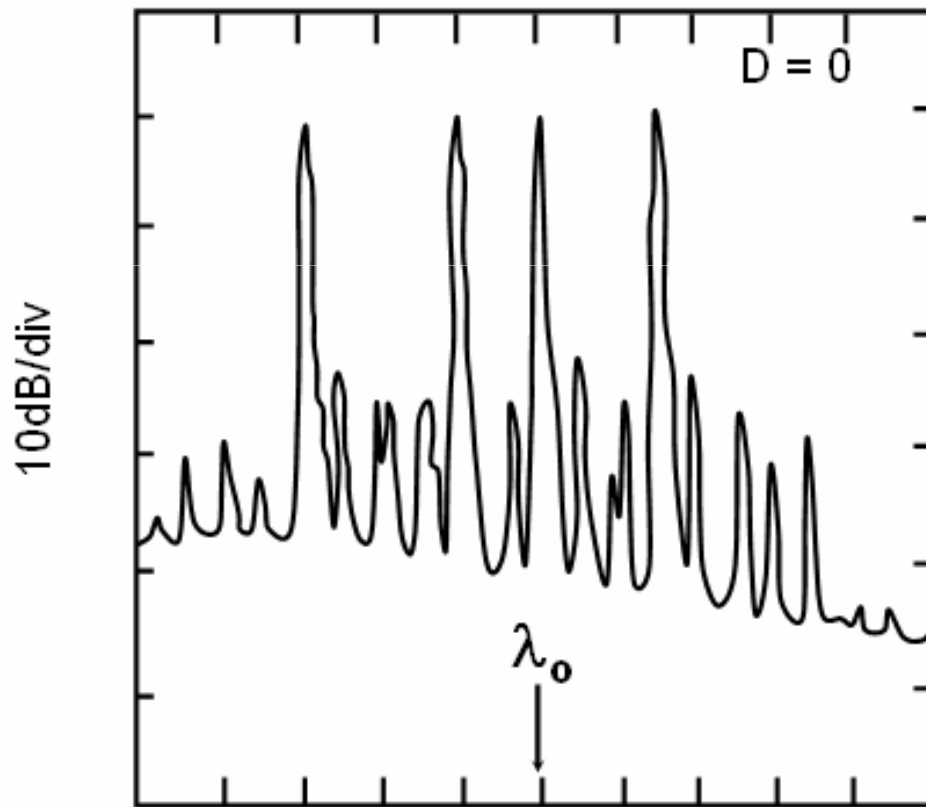
Disperzija in FWM



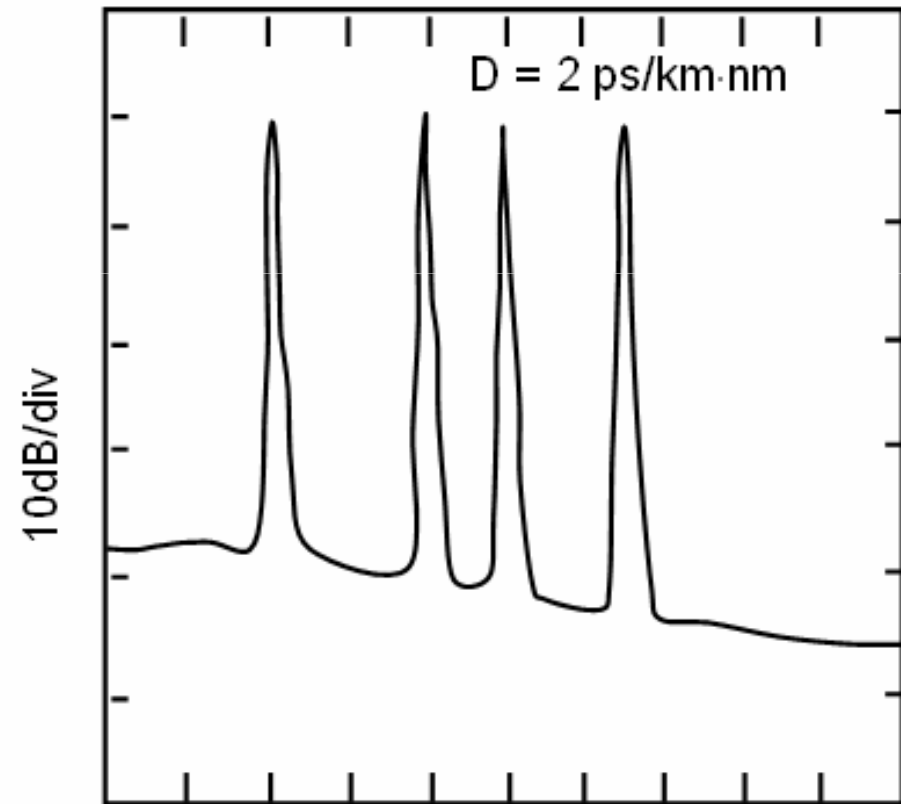
Učinek disperzije na FWM

$$P_{vh} = 3 \text{ dBm/kanal}$$

Vlakno DSF (25 km), $D = 0$



Vlakno NZDSF (50 km), $D = 0$



Valovna dolžina (1 nm/div)

Nelinearno sipanje

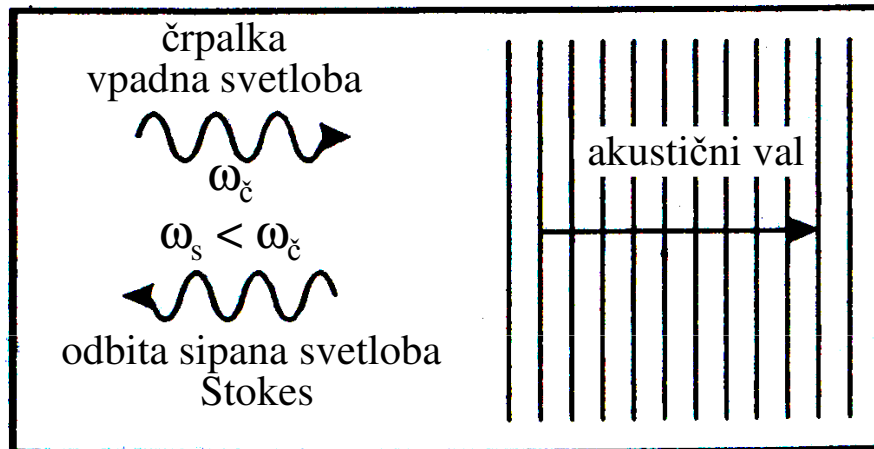
Interakcija svetlobe s fononi:

1. Stimulirano Brillouinovo sipanje (SBS)
 - Interakcija svetlobe z akustičnimi fononi nizke energije
2. Stimulirano Ramanovo sipanje (SRS)
 - Interakcija svetlobe z “optičnimi” fononi visoke energije

Oba pojava omejujeta moč v vlaknu.

Stimulirano Brillouinovo sipanje

Svetlobni val črpalke vzbudi z elektrostrikcijo akustični val (akustični foton) v vlaknu. Ta ustvari zgoščine in razredčine snovi in s tem potujočo periodično strukturo lomnega količnika. Na njej se svetlobni valj odbija v povratni smeri z manjšim Dopplerjevim pomikom frekvence navzdol (Stokes). Sipanje nastaja že pri nizkih močeh reda mW.



• Značilnosti:

- protismerno sipanje v SiO₂ $g_B = 5 \cdot 10^{-11}$ m/W
- Stokesov premik 11,5 GHz (Dopplerjeva frekvenca)
- širina spektra sipane svetlobe 10 MHz

• Posledice:

- možnost ojačevanja protismernega signala
- razprševanje v povratni smeri, močno sipanje
- močno slabljenje pri veliki moči signala $P > 5$ mW
- omejitev moči v vlaknu pod 5 mW.

Sklopni enačbi:

$$\frac{dP_s}{dz} = -\frac{g_B}{A_{ef}} P_c P_s + \alpha P_s$$

$$\frac{dP_c}{dz} = -\frac{g_B}{A_{ef}} P_c P_s - \alpha P_c$$

α koeficient slabljenja

g_B Brillouinov koeficient

Posledicam se izognemo, če pri večjih močeh razširimo spekter svetlobe, npr. s frekvenčno modulacijo

Omejitve zaradi SBS

- **stimulirano Brillouinovo sipanje** pri (že razmeroma nizki) vpadni moči $P_s > P_B$ povzroči:
 - omejitev moči v vlaknu
 - povečan odboj in povečano slabljenje pri moči $P > 5$ mW, nasičenje moči
 - povečan intenzitetni šum (pomembno pri analogni modulaciji)

- **Brillouinova pragovna moč:**

- ozkopasovni nemoduliran signal:

$$P_B = 21 \frac{A_{ef} \alpha}{g_B} = 21 \frac{A_{ef}}{g_B L_{ef}}$$

$g_B = 5 \cdot 10^{-11}$ m/W Brillouinov koeficient

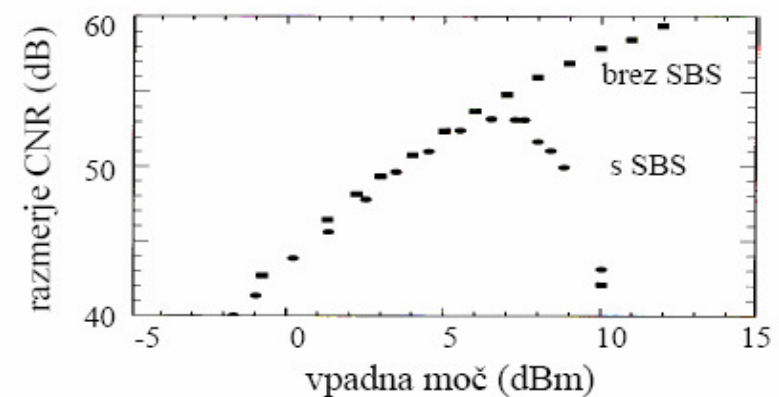
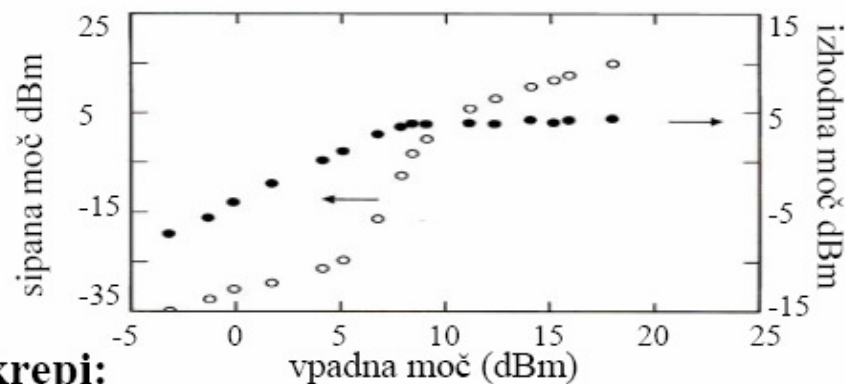
$P_B = 3 - 5$ mW.

- širokopasovni moduliran (FM) signal:

$$P_B = 21 \frac{A_{ef}}{g_B L_{ef}} \left(1 + \frac{\Delta \nu_s}{\Delta \nu_B} \right)$$

$\Delta \nu_s$ širina spektra signala

$\Delta \nu_B = 20$ MHz Brillouinov spekter



- **Ukrepi:**

- omejitev moči signala pod 5 mW
- razširitev spektra signala s FM na 200 - 400 MHz poviša Brillouinov prag 10 do 20 krat
- koristen učinek izolatorjev v vlakenskih ojačevalnikih

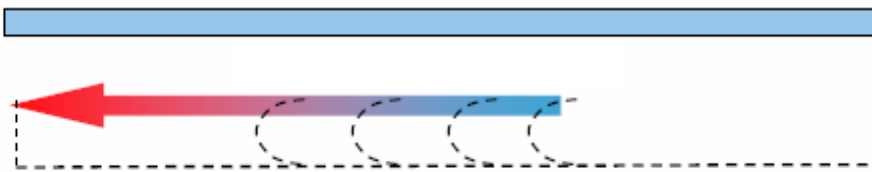
Omejitve zaradi SBS

- Močan odboj zaradi stimuliranega Brillouinovega sipanja se sipa nazaj proti sprejemniku zaradi Rayleighovega sipanja in na sprejemu povzroča motnjo

Vhodna moč



SBS odbita moč



Izhodna moč

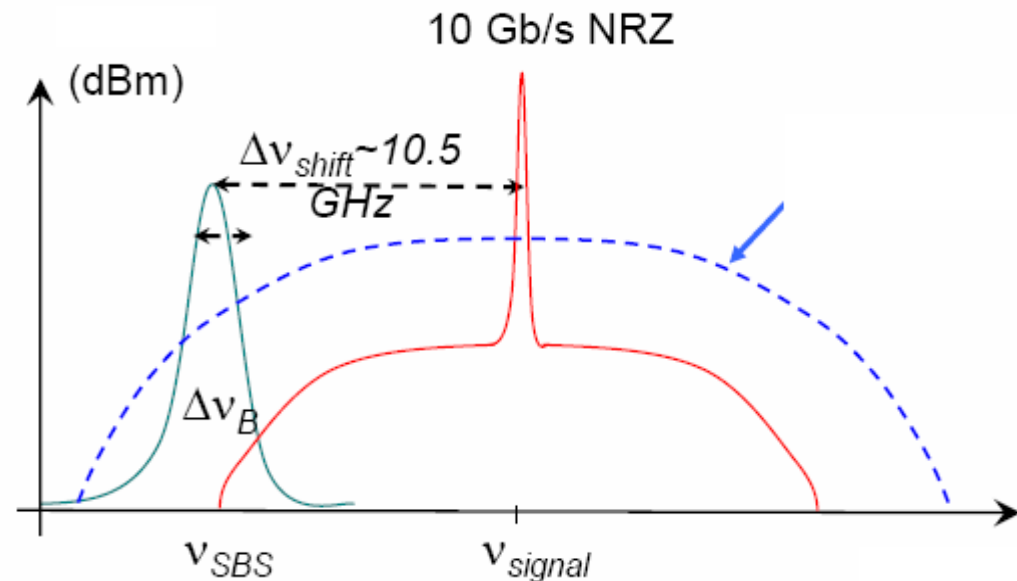


Dvakratno sipana moč na izhodu iz vlakna

Rayleighovo povratno sipanje
Odboj na diskretnih delcih

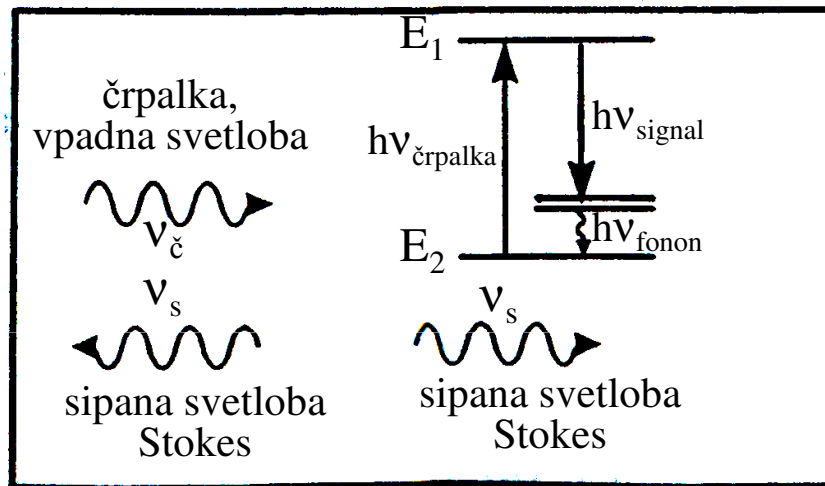
Škodljivi učinek SBS:

- Omejuje moč v vlaknu.
- Zaradi dvakratnega sipanja (Brillouin in Rayleigh) in diskretnega odboja se v frekvenčnem pasu sprejemniku pojavlja šum.



Stimulirano Ramanovo sipanje

Neresonančni pojav zaradi velike razpršenosti stanj vibracijske energije molekul v amorfni snovi stekla. Frekvenca svetlobe se premakne navzdol (Stokes), generirajo se optični fononi. Sipanje se pojavlja pri visoki moči svetlobe v vlaknu reda 0,5 W.



Sklopni enačbi:

$$\frac{dP_s}{dz} = \frac{g_R}{A_{ef\check{c}}} P_{\check{c}} P_s - \alpha_s P_s$$

$$\frac{dP_{\check{c}}}{dz} = -\frac{g_R}{A_{efs}} \frac{\nu_{\check{c}}}{\nu_s} P_{\check{c}} P_s - \alpha_{\check{c}} P_{\check{c}}$$

α koeficient slabljenja

g_R Ramanov koeficient

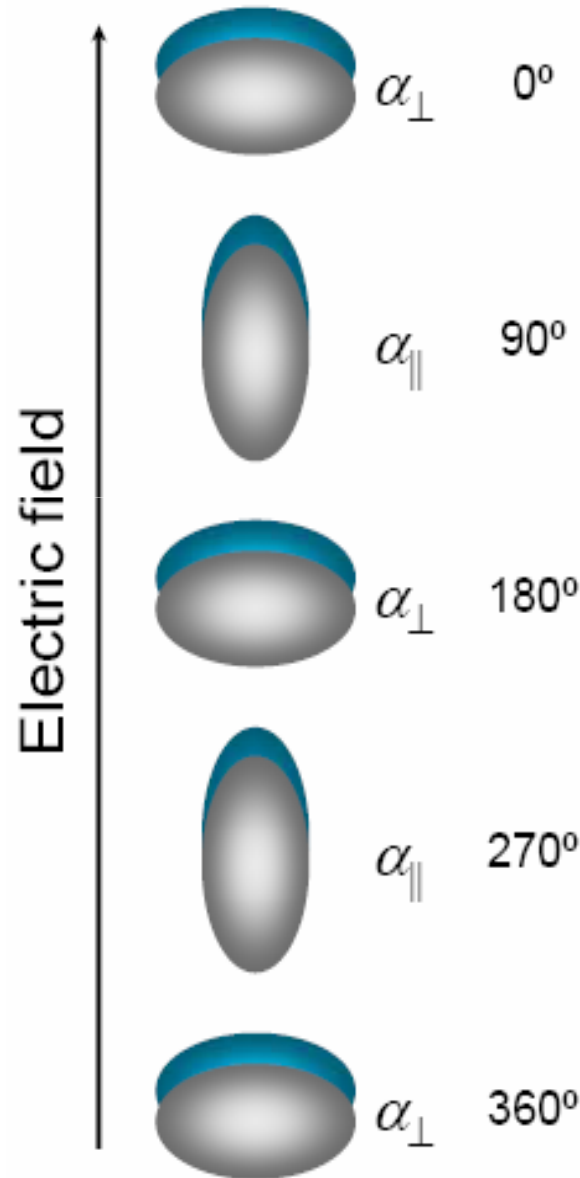
- **Značilnosti:**

- sosmerno in protismerno sipanje, $g_R = 10^{-13}$ m/W
- Stokesov premik do 20 THz
- širina spektra sipanja 6 THz
- šibko sipanje

- **Posledice:**

- možnost nizkošumnega sosmerne in protismerne ojačevanja
- sklop (presluh) med kanali WDM

Ramanov rotacijski proces



If a molecule is rotating at a circular frequency ω_{rot} its polarizability will be time-dependent (if it is anisotropic), and we can write

$$\alpha = \alpha_0 + \Delta\alpha \cos 2\omega_{rot}t$$

where $\Delta\alpha = \alpha_{\parallel} - \alpha_{\perp}$ and a ranges from $\alpha_0 + \Delta\alpha$ to $\alpha_0 - \Delta\alpha$ as the molecule rotates. The 2 appears because the polarizability returns to its initial value twice each revolution.

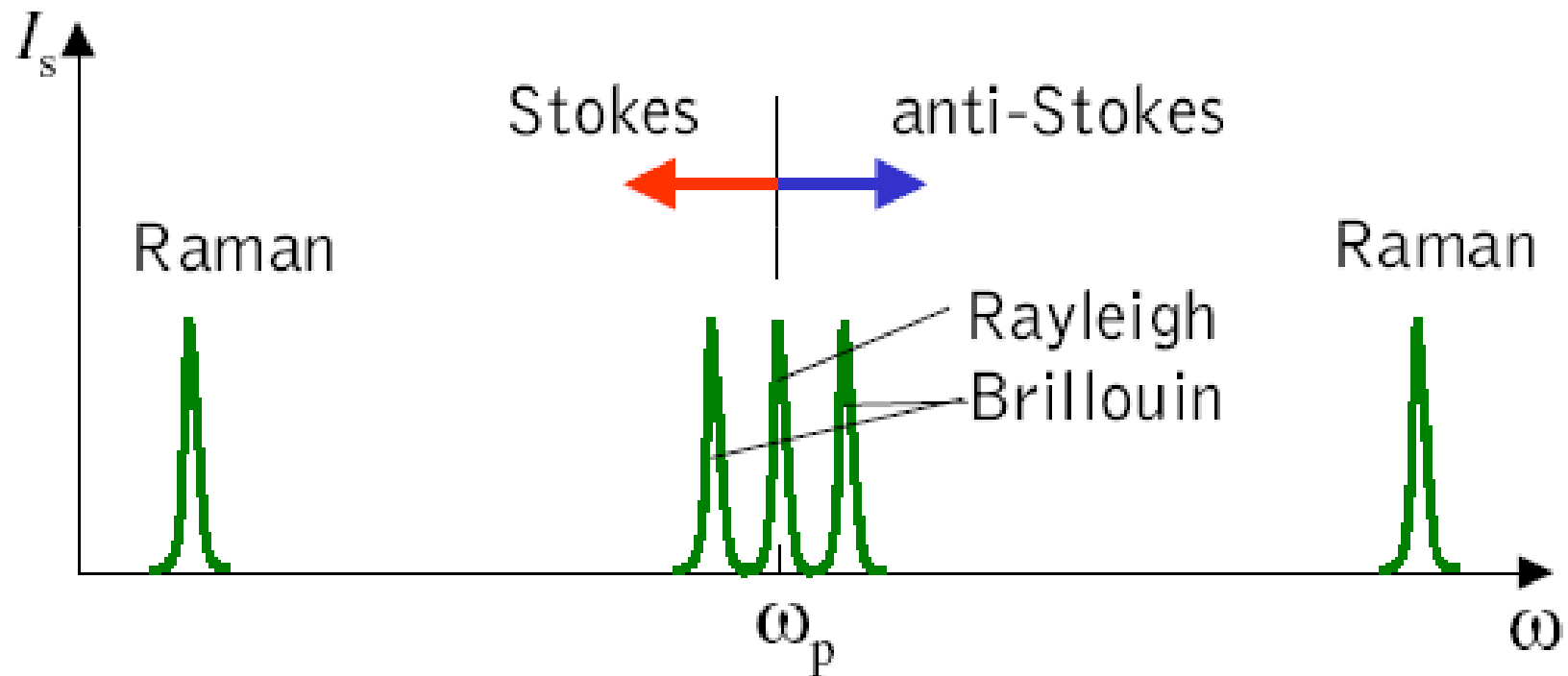
$$\begin{aligned} \vec{p}(t) &= \alpha \vec{E}(t) = (\alpha_0 + \Delta\alpha \cos 2\omega_{rot}t) \vec{E}_0 \cos \omega_0 t \\ &= \alpha_0 \vec{E}_0 \cos \omega_0 t + \frac{1}{2} \vec{E}_0 \Delta\alpha \{ \cos(\omega_0 + 2\omega_{rot})t + \cos(\omega_0 - 2\omega_{rot})t \} \end{aligned}$$

Rayleigh **anti-Stokes** **Stokes**

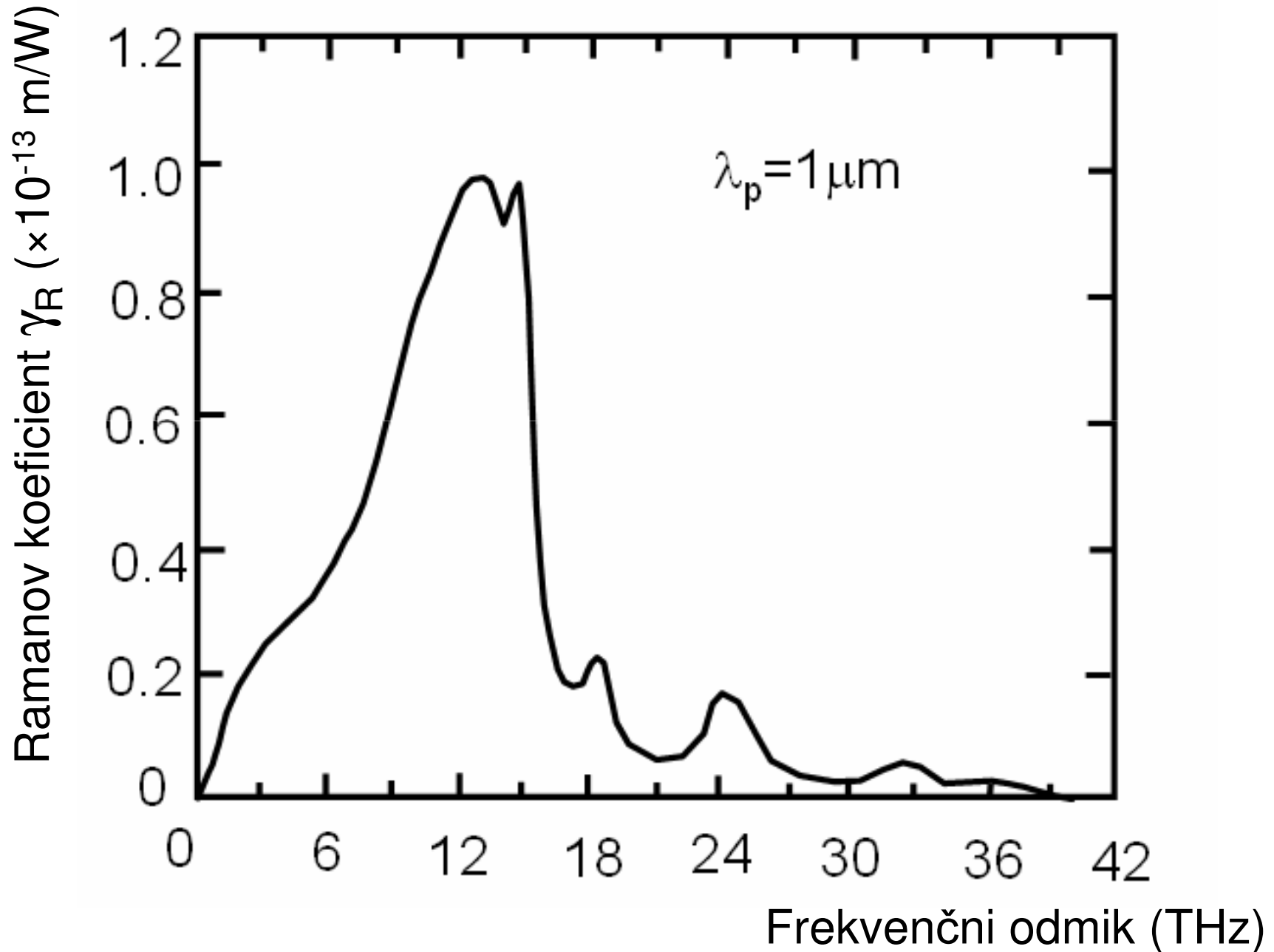
Rotational Raman activity requires that $\Delta\alpha \neq 0$

The fact that the polarizability returns to its initial value twice each revolution is the origin of the selection rule: $\Delta J = \pm 2$

Nelinearno sipanje – valovni produkti ⁴³



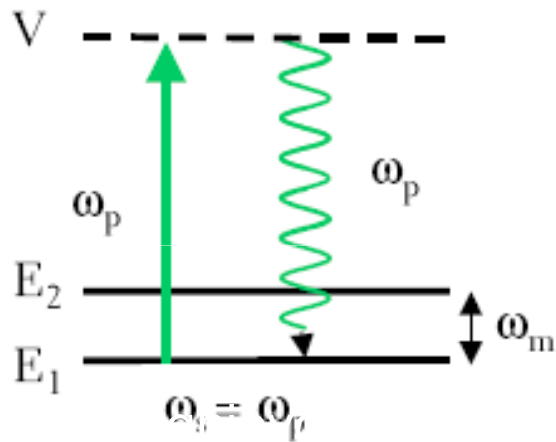
Spekter Ramanovega ojačenja



Linearno in nelinearno sipanje

Rayleighjevo sipanje:

$V =$ virtualni nivo

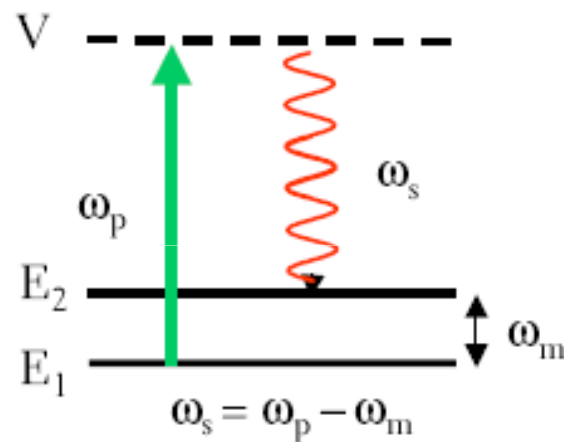


Linearno sipanje

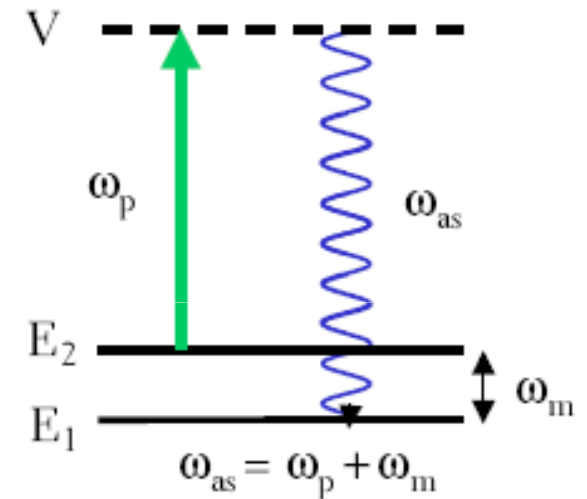
Fotoni se sipajo v vse smeri
(dipolsko sevanje)

Spontano Ramanovo sipanje:

Stokes



anti-Stokes



Nelinearno sipanje

Fotoni se sipajo v poljubnih smereh

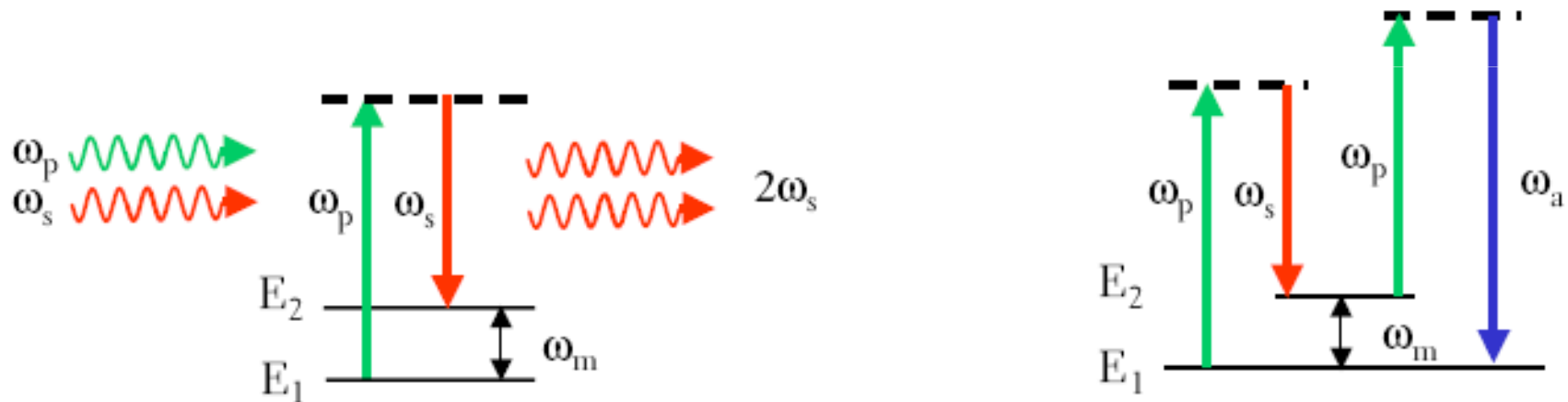
$N_2 = N_1 e^{-\hbar\omega_m / kT}$ število fotonov na E_2 in E_1

Sevanje anti-Stokes mnogo šibkejše.

Stimulirano Ramanovo sipanje

- Pri močni črpalki se število sevanih Ramanovih fotonov močno poveča. Zato:

Stimulirajo koherentno Ramanovo sevanje v smeri širjenja črpalke in s tem signal ojačujejo.



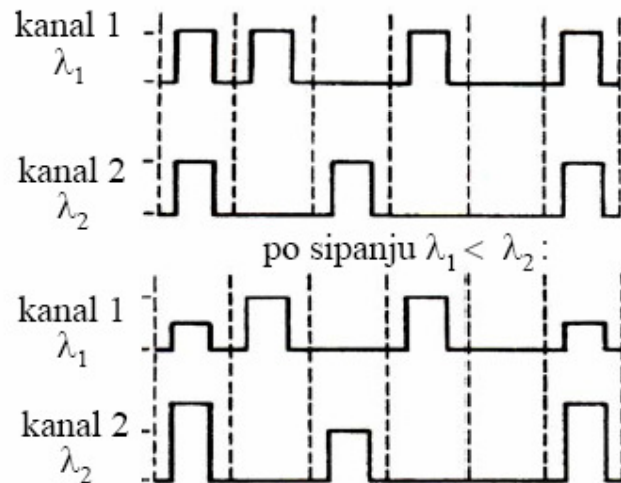
$$\hbar\omega_p + \hbar\omega_s = 2\hbar\omega_s + \hbar\omega_m$$

Stokesov in anti-Stokesov signal imata lahko primerljivo intenziteto.

Omejitve zaradi SRS

- **stimulirano Ramanovo sipanje pri razmeroma veliki vpadni moči $P_s > P_R$:**

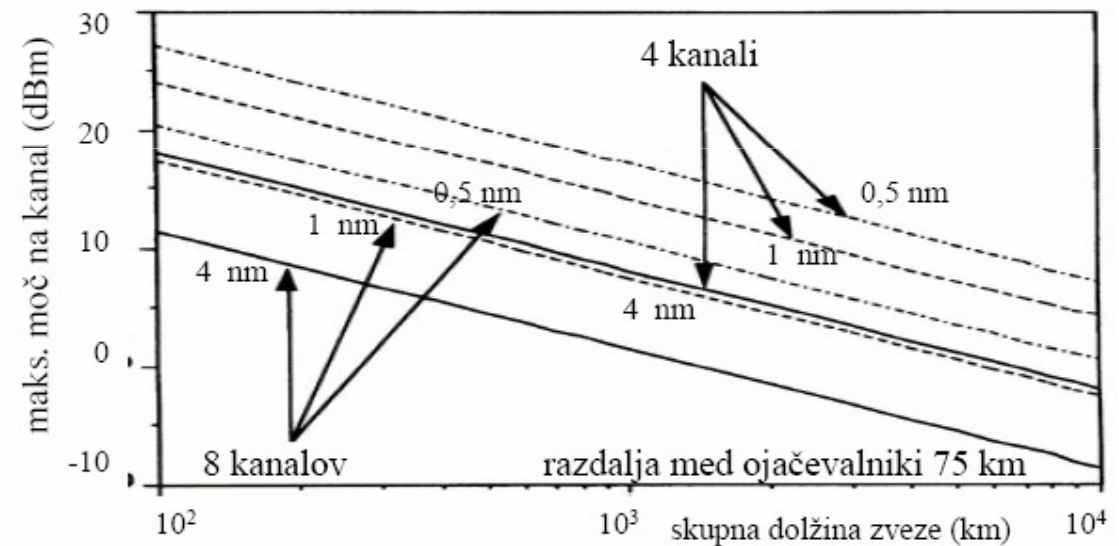
- presluh med kanali WDM v primeru sočasnih enic, ojačitev signala nižje frekvence in izčrpavanje moči višje frekvence (nagib spektra)
- degradacija razmerja S / N



- **Ramanova pragovna moč:**

$$P_R = 16 \frac{A_{ef} \alpha}{g_R} = 16 \frac{A_{ef}}{g_R L_{ef}}, \quad g_R = 10^{-13} \text{ m/W}$$

Ramanova pragovna moč $P_R > 500 \text{ mW}$. Sipanje povzroča sklope med kanali v WDM prenosu. V enokanalnem prenosu ni omejitve.



Dopustna prenašana moč se zmanjšuje z večanjem števila kanalov WDM, z večanjem frekvenčne razlike med kanali in z večanjem razdalje.

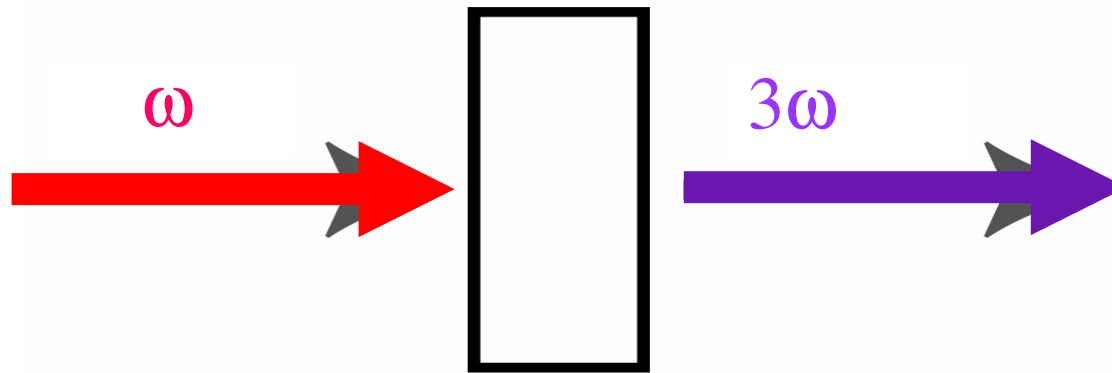
- **Ukrepi:**

- omejitev moči pri velikem številu kanalov
- z zmanjšanjem valovnega razmika med kanali se zmanjšuje sklop med njimi
- z večanjem disperzije vlakna zmanjšujemo sklop

Drugi nelinearni pojavi

- Generacija 2. in 3. harmonske
- Samofokusiranje
- Fazna konjugacija
- Solitoni
- Fotosenzitivnost
- Drugo

Generacija tretje harmonske

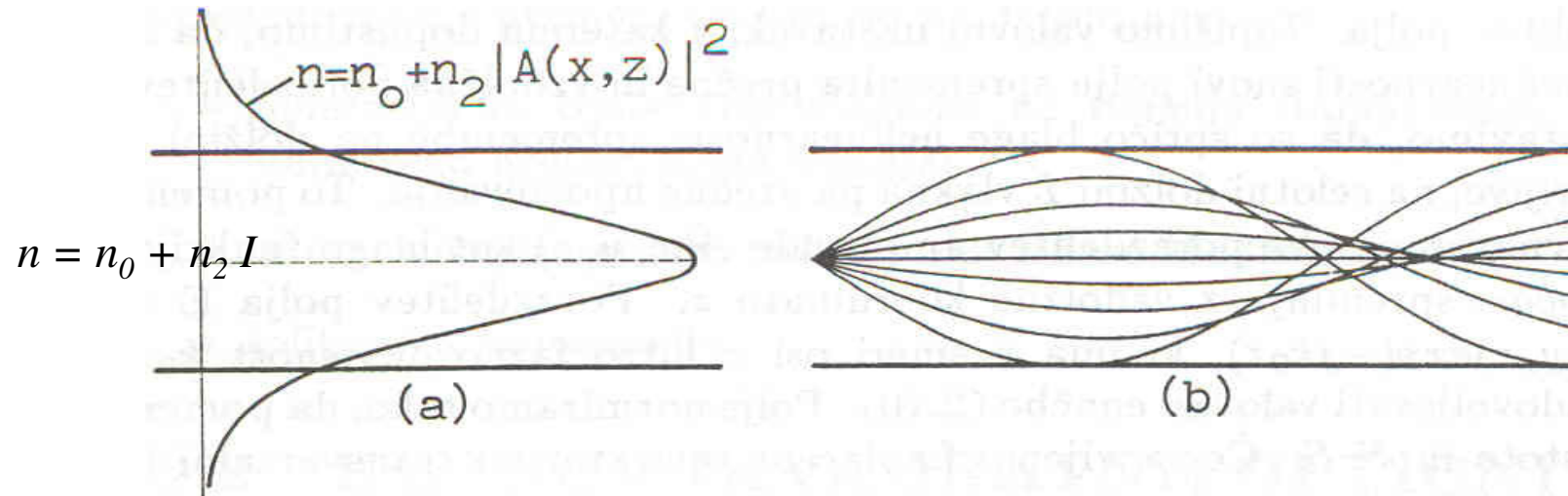


$$\mathcal{E}(\vec{r}, t) = E \exp[i(\omega t - kz)] + E^* \exp[-i(\omega t - kz)]$$

$$\mathcal{E}(\vec{r}, t)^3 = E^3 \exp[i(3\omega t - 3kz)] + E^{*3} \exp[-i(3\omega t - 3kz)] \\ + \text{other terms}$$

Samofokusiranje Gaussovega snopa ⁵⁰

Gaussov snop svetlobe povzroči v sicer homogeni nelinearni snovi spremembo lomnega količnika v sorazmerju z gostoto moči. Ustvari se vlakno Gaussovega lomnega lika, ki žarek fokusira in preprečuje njegovo difrakcijo.



$$n = n_0 + n_2 I_0 \exp(-2r^2/w_0^2) \quad \text{lomni lik v snovi}$$

$$n_0 + n_2 I_0 (1 - 2r^2/w_0^2) \quad \text{približek lomnega lika}$$

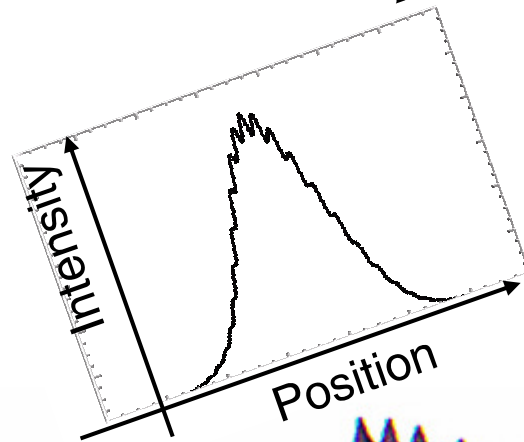
Faza v snopu:

$$\phi(r) = nk_0L = n_0k_0L + n_2k_0L I_0(1 - 2r^2/w_0^2)$$

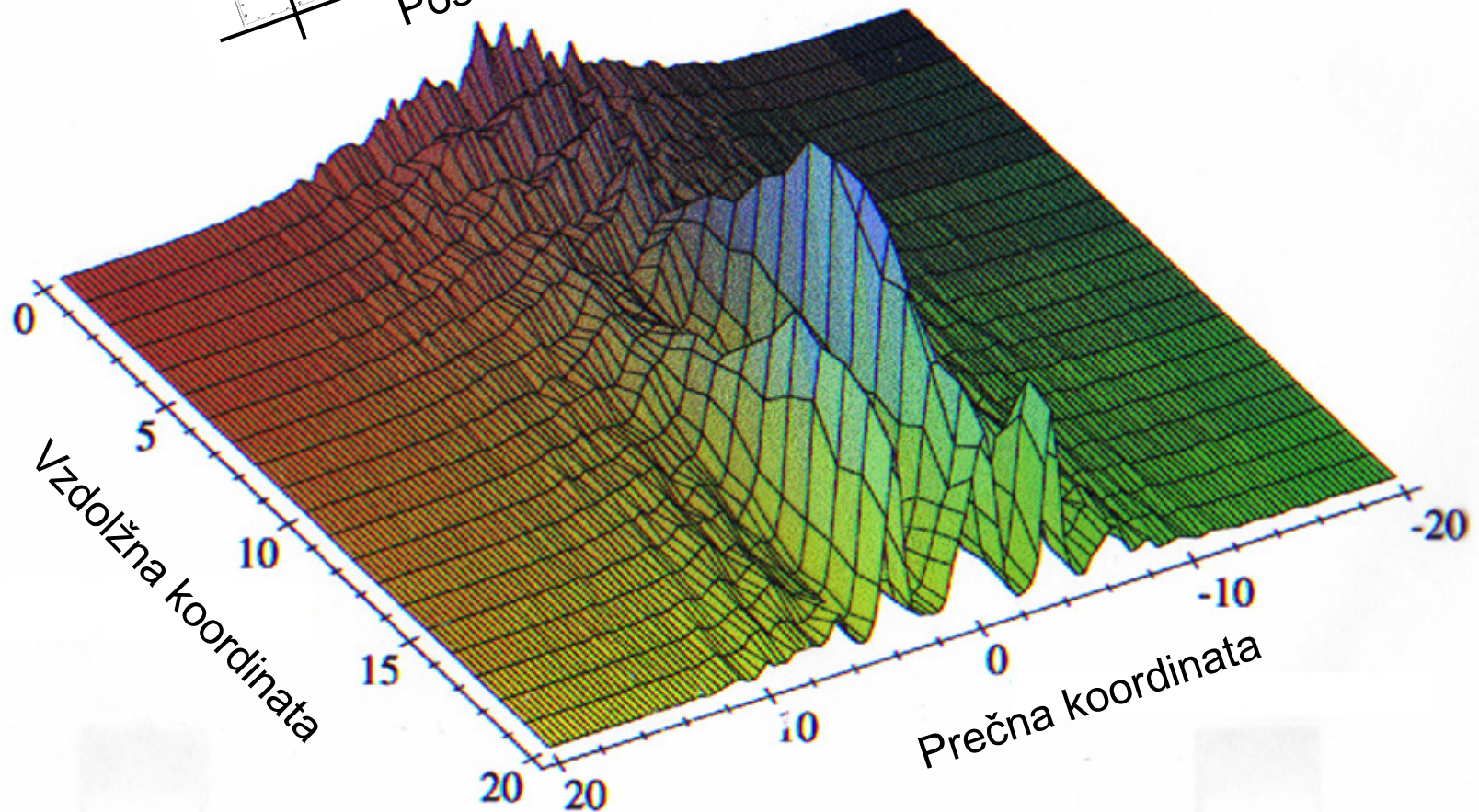
$$\phi(r) = \text{konst.} - 2n_2k_0LI_0(r^2/w_0^2) \quad \text{podobno delovanju leče}$$

Samofokusiranje v lokalnem obsegu

51

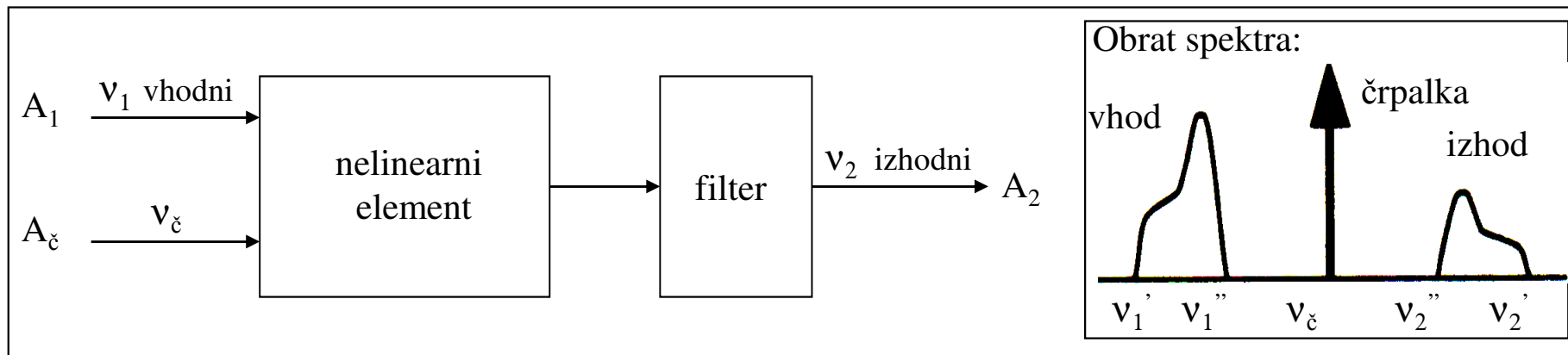


Gaussov snop neregularne oblike lahko skupaj s šumom povzroči ekstremna lokalna polja, ki porušijo material (primer resonator laserja).

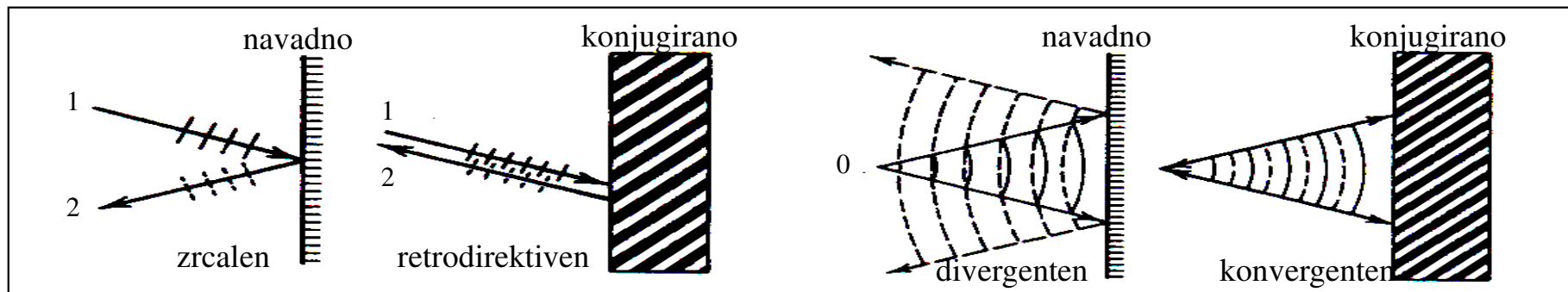


Fazna konjugacija

- Fazni konjugator je nelinearni element (nelinearno vlakno, polprevodniški ojačevalnik), ki deluje na osnovi degeneriranega štirivalovnega mešanja ($A_2 = A_1^* A_c^2$, $\nu_2 = 2\nu_c - \nu_1$)



- Izhodna amplituda je konjugacija vhodne amplitude $A_2 = A_1^*$; izhodna faza je $\phi_2 = -\phi_1$
- Izhodni spekter ima obrat po frekvenci $F_2(\nu + \Delta\nu) = F_1(\nu - \Delta\nu)$; nizke frekvence vhodnega spektra gredo v visoke frekvence izhodnega spektra in obratno
- Izhodni signal ima obrat po času $s_2(t) = s_1(-t)$; prehitvajoči del impulza se spremeni v zaostajajočega in obratno
- Primer: zrcalen in divergenten odboj od navadnega zrcala in retrodirektiven ter konvergenten odboj od konjugiranega zrcala



Fazna konjugacija in časovni obrat⁵³

Optični val:

$$E(x, y, z, t) = E_0(x, y, z) \exp[i(kz - \omega t)] + E_0^*(x, y, z) \exp[-i(kz - \omega t)]$$

Fazno konjugiran optični val:

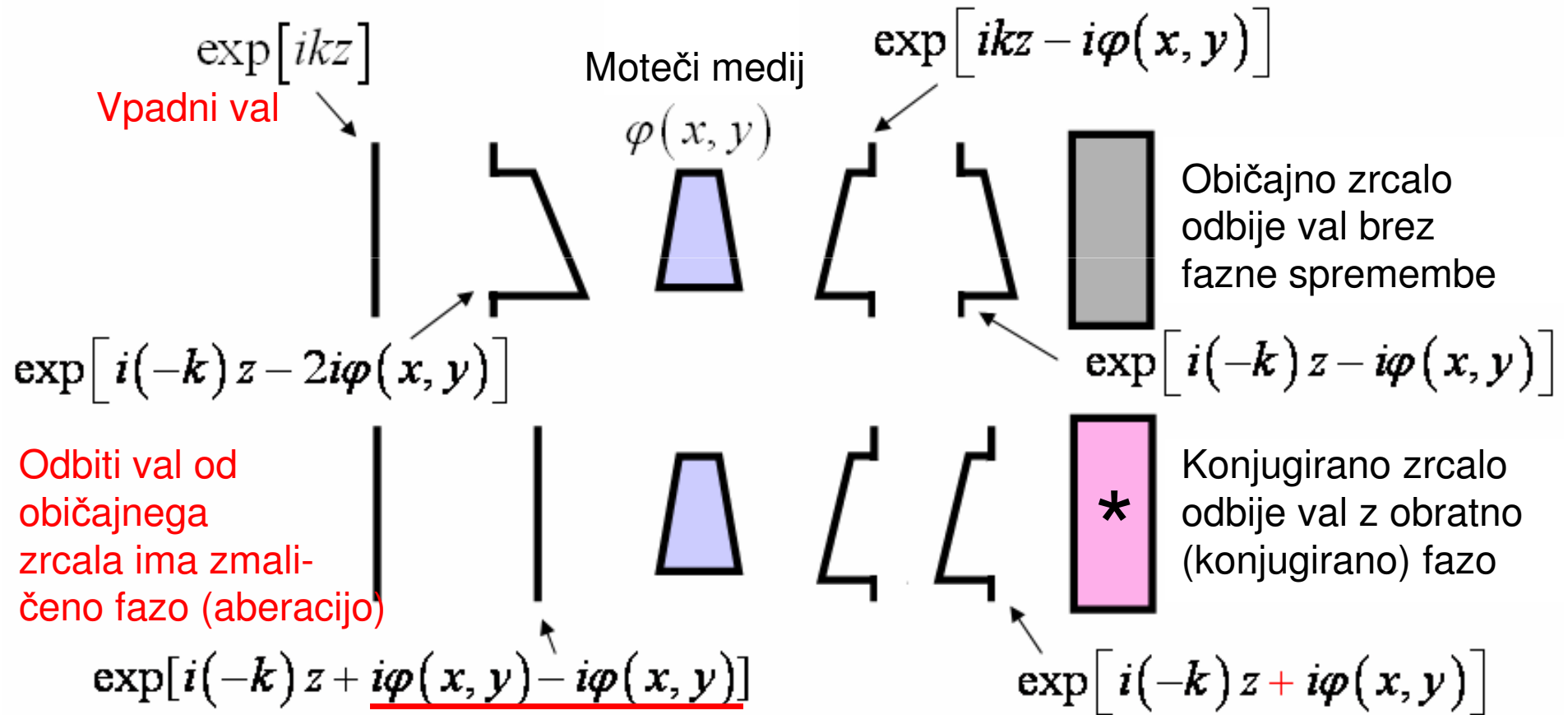
$$\begin{aligned} E_{pc}(x, y, z, t) &= E_0^*(x, y, z) \exp[i(-kz - \omega t)] + E_0(x, y, z) \exp[-i(-kz - \omega t)] \\ &= E_0^*(x, y, z) \exp[-i(kz - \omega\{-t\})] + E_0(x, y, z) \exp[i(kz - \omega\{-t\})] \\ &= E_0(x, y, z) \exp[i(kz - \omega\{-t\})] + E_0^*(x, y, z) \exp[-i(kz - \omega\{-t\})] \end{aligned}$$

$$E_{pc}(x, y, z, t) = E(x, y, z, -t)$$

Fazno konjugiran signal je signal s časovnim obratom.

Fazna konjugacija

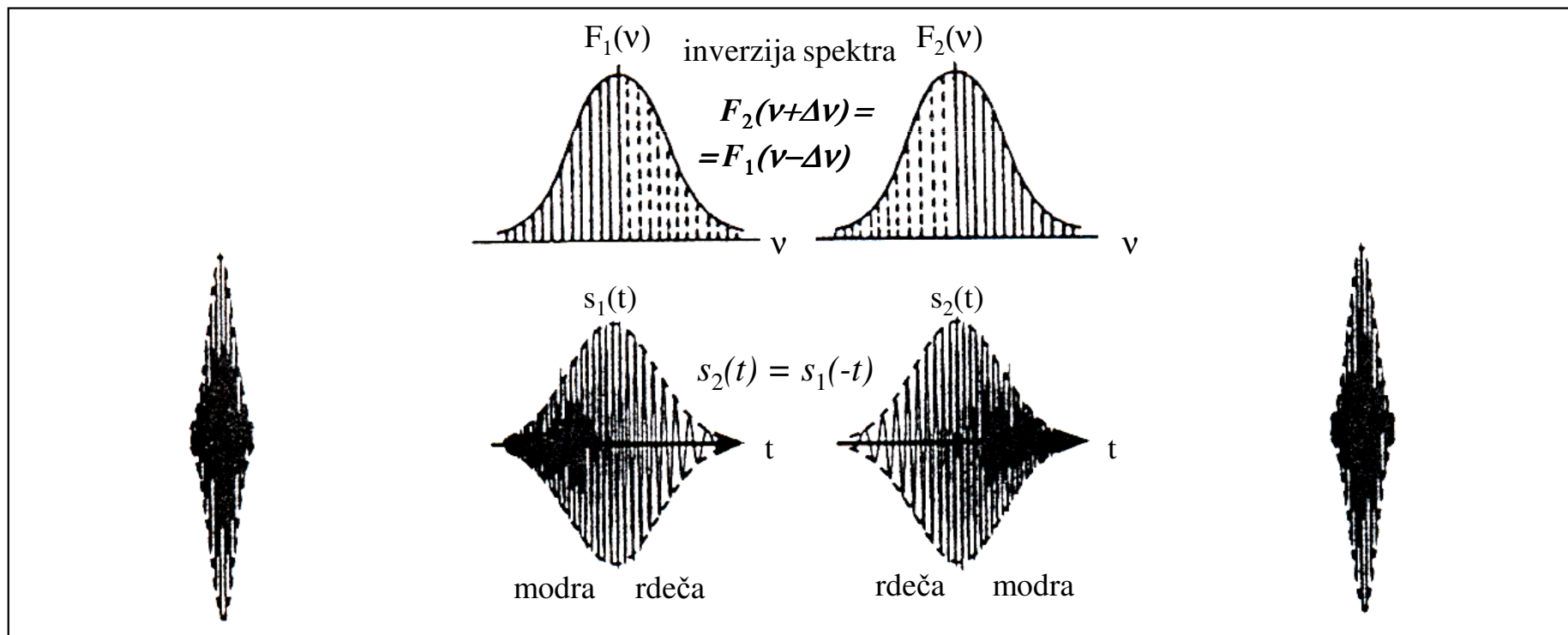
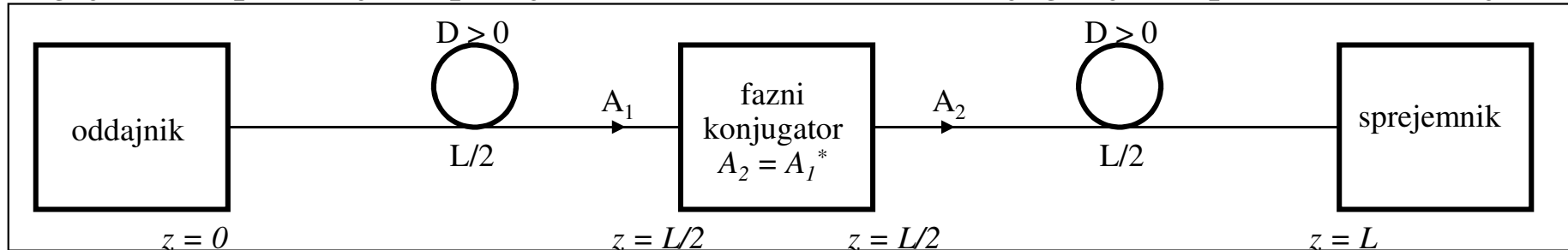
Fazna konjugacija je nelinearni proces, pri katerem dobi polje konjugirano vrednost ($E \longrightarrow E^*$). S fazno konjugacijo odboja na konjugiranem zrcalu odstranjujemo aberacije polja.



Odbiti val od konjugiranega zrcala je očiščen aberacije $\varphi(x, y)$

Kompenzacija disperzije s faznim konjugatorjem

- Fazni konjugator na polovični dolžini odseka kompenzira posledice disperzije in nelinearnosti
- Pogoji za kompenzacijo disperzije in nelinearnosti: fazna konjugacija in spektralna inverzija



- Je najpopolnejši način kompenzacije disperzije; zaradi velike zahtevnosti je metoda ostala laboratorijska

Solitoni

- **Definicija:** kratki impulzi naravne oblike, ki se širijo po nelinearnem disperznem mediju.
- **Pogoj:** uravnoteženo nasprotno delovanje anomalne disperzije $D > 0$ in lastne fazne modulacije (navidezno $D < 0$)

$D > 0$ $\frac{\partial v_g}{\partial \omega} > 0$ $\frac{\partial^2 \beta}{\partial \omega^2} < 0$ anomalna disperzija		v_g , navidezna nelinearnost lastna fazna modulacija	$D < 0$ $\frac{\partial v_g}{\partial \omega} < 0$ $\frac{\partial^2 \beta}{\partial \omega^2} > 0$ normalna disperzija
--	--	--	--

- **Kompensacija** disperzije D in nelinearnosti n_2 :

		solitoni: $A(t) = \text{sech}\left(\frac{t}{\tau}\right)$ ovojnica
		vršna moč: $P_{sol} = \frac{\lambda^3 D A_{ef}}{(2\pi\tau)^2 c n_2}$
		energija: $W \doteq P_{sol} \tau \propto \frac{D}{\tau}$

- **Uporaba:** zaradi velike zahtevnosti so solitonski prenos v praksi se (še?) ni uveljavil

Konec