

Parametriniai šviesos prietaisai

Lauryna Petravičiūtė

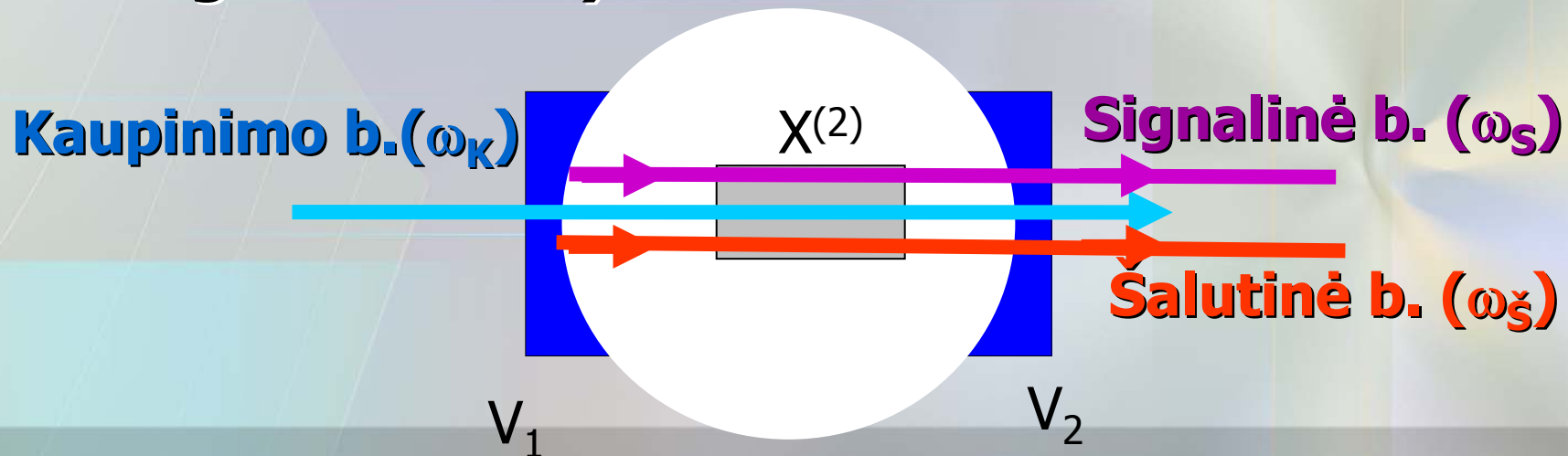
Parametriniai šviesos prietaisai

(PŠP) –

sukuria 2 koherentes bangas (signalinę ir šalutinę) iš vienos kaupinimo bangos.

PŠP susideda iš:

- netiesinio kristalo;
- rezonatoriaus (jei optiniai rezonatoriai generatoriai).



Istorija

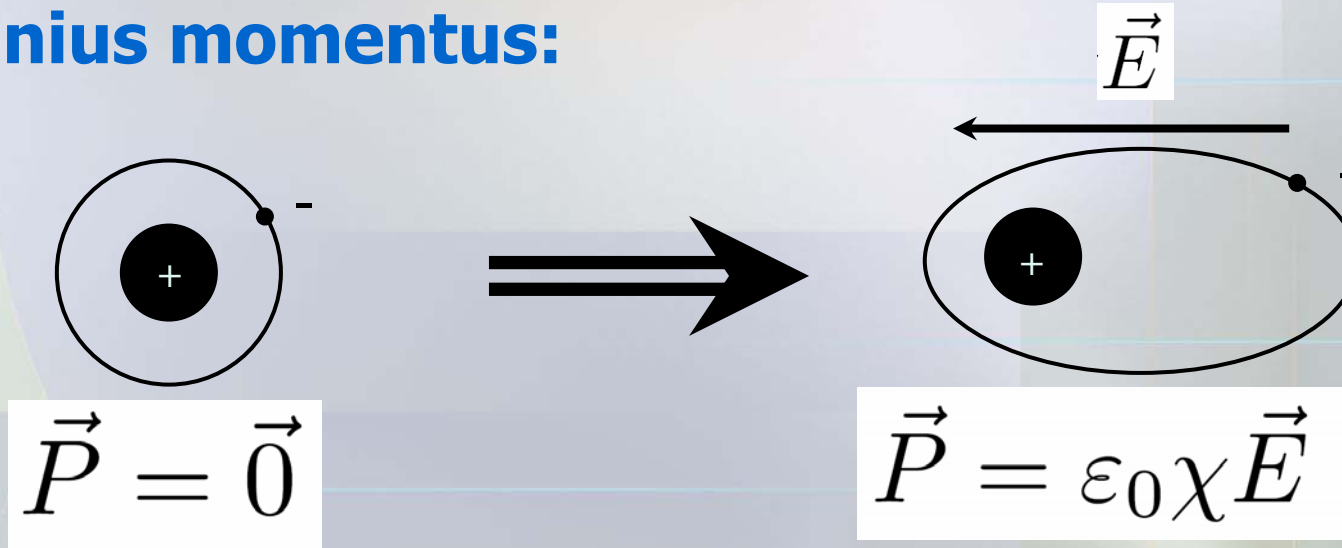
- Pirmas **impulsinio kaupinimo** PŠP 1965 m.:
Giordmaine & Miller (netiesinis kristalas - LiNbO_3 ,
0.96-1.16 μm).
Phys. Rev. Lett 14, 973 (1965)
- Pirmas **nuolatinio kaupinimo** PŠP 1968 m.:
Smith et al. (netiesinis kristalas - $\text{Ba}_2\text{NaNb}_2\text{O}_{15}$)
- Susidomėjimas PŠP atgijo nuo 1980 m. dėl
netiesinių medžiagų geresnių charakteristikų
(atsparumo, netiesiškumo), stabilesnių, geresnės
pluošto kokybės lazerių.

Pranešimo planas

- Įvadas
 - PŠP apibrėžimas;
 - Istorija.
- Pagrindiniai principai:
 - 2 eilės netiesiškumas $\chi^{(2)}$;
 - (Kvazi)Fazinio sinchronizmo sąlygos;
 - Spinduliuotės derinimas;
- PŠP:
 - Parametriniai šviesos generatoriai;
 - Parametriniai šviesos stiprintuvai;
 - Parametriniai rezonuojantys šviesos generatoriai.
- PŠP pritaikymai.

Netiesinė optika

Elektrinis laukas, veikdamas medžiagą, sukuria dipolinius momentus:

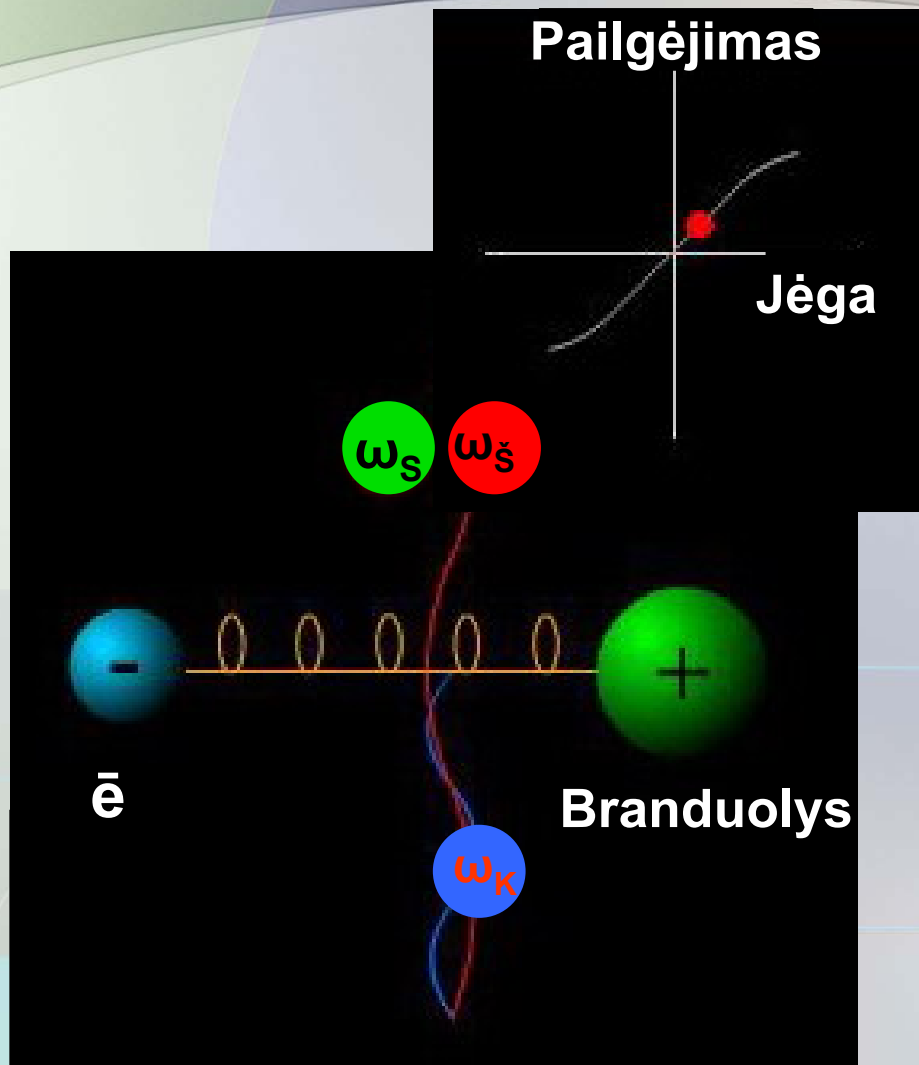


Kai elektrinis laukas stiprus:

$$\vec{P} = \epsilon_0 (\chi^{(1)} \vec{E} + \chi^{(2)} \vec{E}^2 + \chi^{(3)} \vec{E}^3 + \dots)$$

Pasireiškia netiesiniai efektai

Netiesinė optika



nagrinėja m ($m > 2$)
optinių bangų sąveiką
medžiagoje, kurios
netiesinis – optinio
jautrio tenzorius $\chi^{(m-1)}$.

$\chi^{(m-1)}$ – ω , T f-ja.

PŠP:

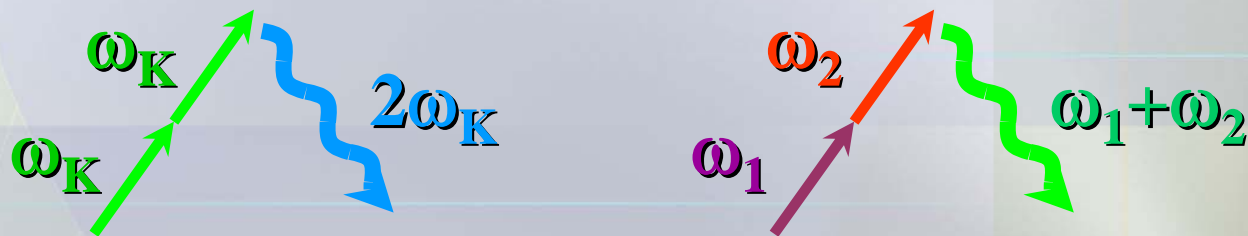
$m=3$, $\chi^{(2)} \neq 0$ -

**necentrosimetrinės
kristalinės medžiagos**

$\chi^{(2)}$ netiesiškumas

Galimi 2 procesai:

- **Antros harmonikos generacija (AHG)**, kurios metu sukuriama dažnio $2\omega_K$ banga;



- **Parametrinė šviesos sąveika** – sukuriamos 2 bangos, kurių dažnis ω_S ir $\omega_{\check{S}}$; sutarimas: $\omega_S > \omega_{\check{S}}$



Tvermės dėsniai

- **Energijos tvermės dėsnis, $E=\hbar\omega$:**

$$\omega_K = \omega_{\check{S}} + \omega_S$$

- **Impulso tvermės dėsnis, $p=\hbar k$:**

$$k_K = k_S + k_{\check{S}}$$

Svarbu, kad nauja signalinė ir/arba šalutinė banga liktų tokios pačios fazės kaip prieš tai netiesinėje terpėje sukurtos elektromagnetinės bangos.

Tvermės dėsniai

- **Energijos tvermės dėsnis, $E = \hbar\omega$:**

$$\omega_K = \omega_{\check{S}} + \omega_S$$

- **Kadangi:**

$$k = \frac{n\omega}{c}$$

Tvermės dėsniai

- **Energijos tvermės dėsnis, $E = \hbar\omega$:**

$$\omega_K = \omega_{\check{s}} + \omega_S$$

- **Fazinio sinchronizmo sąlyga:**

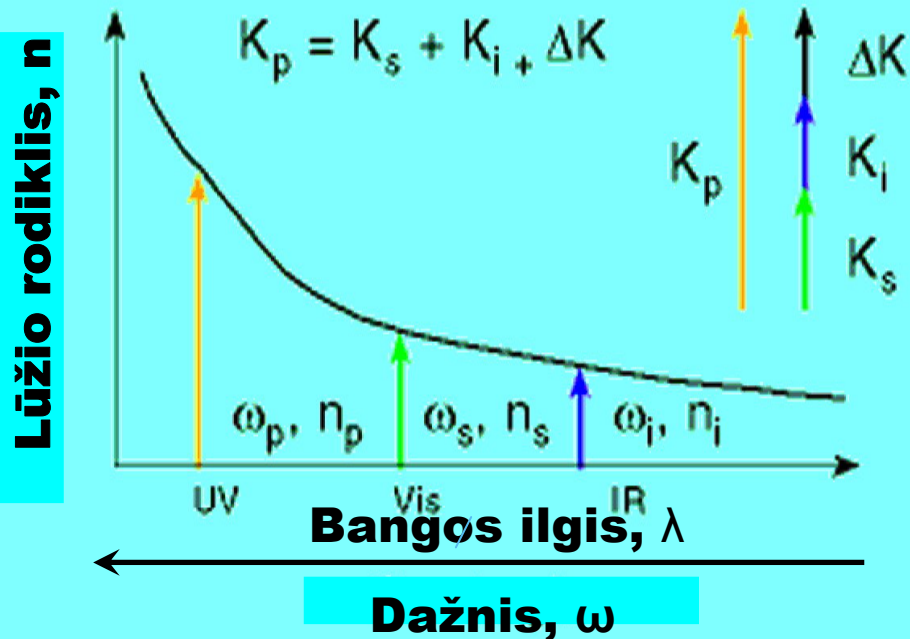
$$k = \frac{n\omega}{c}$$

$$n_K \omega_K = n_S \omega_S + n_{\check{s}} \omega_{\check{s}}$$

n_i - medžiagos lūžio rodiklis; $i=k, s, \check{s}$

Dispersija medžiagose

Normalioji dispersija



- Dėl dispersijos – Δk :

$$k_K = k_S + k_{\check{S}} + \Delta k$$


- **Normalioji dispersija** n didėja, didėjant ω – neįmanomas fazinis sinchronizmas;

- **Anomalioji dispersija** – n mažėja, didėjant ω – įmanomas fazinis sinchronizmas.

Dispersija medžiagose

- Fazinis sinchronizmas neįmanomas normalios dispersijos kristaluose, nes:

$$n_K \omega_K = n_S \omega_S + n_{\check{S}} \omega_{\check{S}} ; \quad n_K = \frac{n_{\check{S}} \omega_{\check{S}} + n_S \omega_S}{\omega_K}$$

- **Normali dispersija:** $\omega_K \geq \omega_S \geq \omega_{\check{S}}$  $n_K \geq n_S \geq n_{\check{S}}$

$$n_K - n_S = (n_{\check{S}} - n_S) \frac{\omega_{\check{S}}}{\omega_K}$$

> 0 < 0

Lygtis neturi sprendinių

Netiesinės medžiagos

- Fazinį sinchronizmą galima pasiekti dėl **dvejopo spindulių lūžimo** ($n_o - n_e$) netiesinėse medžiagose;
- **Dvejopas spindulių lūžimas** priklauso nuo:
 - Medžiagos lūžio rodiklio n ;
 - Poliarizacijos krypties \vec{P} ;
 - Spinduliuotės krypties \vec{k} ;

I, II fazinio sinchronizmo tipai

Neigiamas kristalas –
 ω_k poliarizacija n_e



$n_o > n_e$ – neigiamas kristalas

$n_e > n_o$ – teigiamas kristalas

- Fazinis sinchronizmas dėl dvejetainio spindulių lūžimo:

ω_k parenkama poliarizacija, kurios n mažesnis;

- I tipas – ω_s ; $\omega_{\check{s}}$ vienoda poliarizacija;

- II tipas – ω_s ; $\omega_{\check{s}}$ skirtinga poliarizacija.

I, II fazinio sinchronizmo tipai

**Neigiamas kristalas –
 ω_k poliarizacija n_e**



- Fazinis sinchronizmas dėl dvejo spindulių lūžimo:

ω_k parenkama poliarizacija, kurios n mažesnis;

Teigiamas kristalas

$$(n_e > n_o)$$

Neigiamas kristalas

$$(n_e < n_o)$$

I tipas

$$n_3^o \omega_3 = n_1^e \omega_1 + n_2^e \omega_2$$


$$n_3^e \omega_3 = n_1^o \omega_1 + n_2^o \omega_2$$

II tipas

$$n_3^o \omega_3 = n_1^o \omega_1 + n_2^e \omega_2$$

$$n_3^e \omega_3 = n_1^e \omega_1 + n_2^o \omega_2$$

Signalinės ir šalutinės bangos dažnis nustatomas:

- 
- Keičiant kampą tarp spinduliuotės krypties ir kristalo optinės ašies –
kampinis derinimas
 - Keičiant temperatūrą –
temperatūrinis derinimas.

Spinduliuotės derinimas

Kampinis

$$\frac{1}{n_e(\theta)^2} = \frac{\sin^2 \theta}{\bar{n}_e^2} + \frac{\cos^2 \theta}{n_o^2}$$

θ - tarp optinės ašies ir sklidimo krypties;

\bar{n}_e kai $\theta=90^\circ$.

Pointingo vektorius \vec{S} nėra lygiagretus \vec{k} ypatingajam spinduliui – sklisdami kristalu O ir E išsiskirs – efektyvumas ↓

Temperatūrinis

• Kai kurių medžiagų (LiNbO₃) dvejetainis spindulių lūžis labai priklauso nuo T.

• θ fiksuojamas prie 90° – spinduliuotė derinama, keičiant T.

Kristalinių medžiagų pavyzdžiai

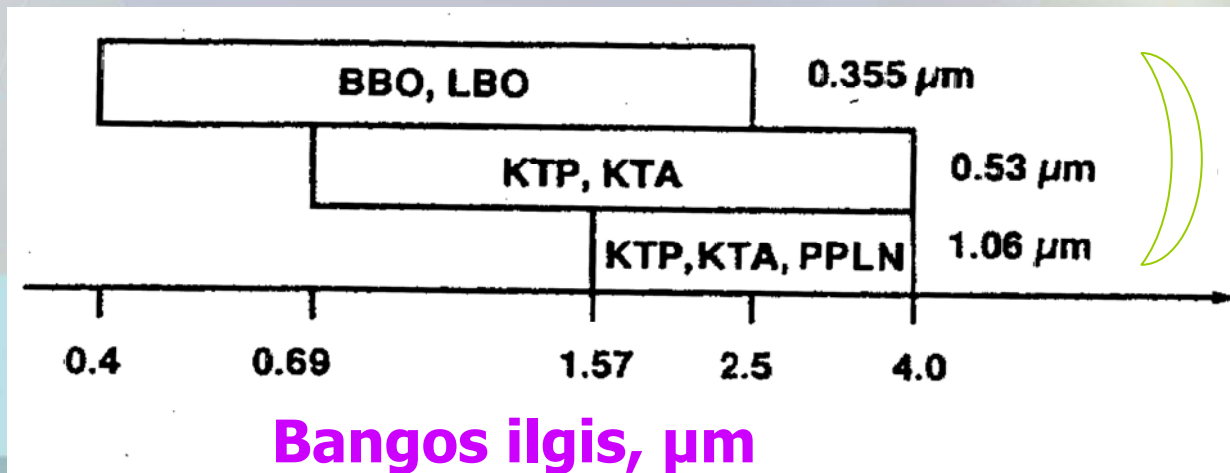
Pirmieji naudoti netiesiniai kristalai:

- **LiNbO_3** – ličio niobatas – impulsinio kaupinimo režimu;
- **$\text{Ba}_2\text{NaNb}_2\text{O}_{15}$** – banana – nuolatinio kaupinimo režimu.



Kitos netiesinės kristalinės medžiagos:

- LBO – ličio triboratas (LiB_3O_5);
- BBO – bario boratas (BaB_2O_4);
- KTP – kalio titanilo fosfatas (KTiOPO_4);
- KTA – kalio titanilo arsenatas (KTiOAsO_4);
- PPLN – periodiškai orientuotas LiNbO_3 ;
- GaAs – galio arsenidas, galimas iki $18\mu\text{m}$ derinimas, nepasižymi dvejomu spindulių lūžimu.



Kaupinimo
Bangos ilgis, λ

Kitos netiesinės kristalinės medžiagos:

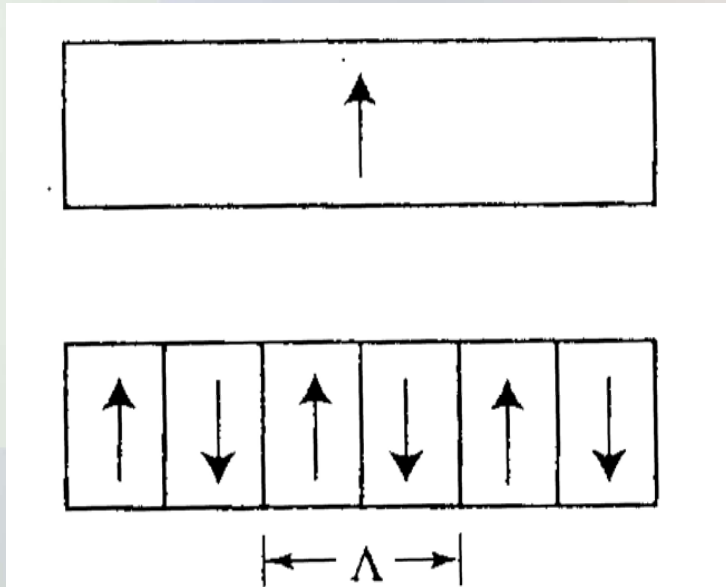
- LBO – ličio triboratas (LiB_3O_5);
- BBO – bario boratas (BaB_2O_4);
- KTP – kalio titanilo fosfatas (KTiOPO_4);
- KTA – kalio titanilo arsenatas (KTiOAsO_4);
- PPLN – periodiškai orientuotas LiNbO_3 ;
- GaAs – galio arsenidas, galimas iki $18\mu\text{m}$ derinimas, nepasižymi dvejomu spindulių lūžimu.

	LBO	BBO	KTP	KTA	AgGaS ₂	LiNbO ₃	PPLN
Pralaidumas, μm	0.16–2.6	0.19–2.5	0.4–3.5	0.4–4.0	0.5–12	0.5–5	0.5–5
Pažeidimų slenkstis, GW/cm^2	2.5	1.5	0.5	0.5	0.03	0.2	0.2
Būdingas ilgis, cm	0.5–1	0.5–1	1–2	1–2	2–4	2–5	2–6

Kvazifazinis sinchronizmas

- Kai kurios medžiagos nepasižymi dvejomu spindulių lūžimu (GaAs) arba jis nedidelis;
- Tam tikromis sąlygomis d_{33} koeficientas staigiai auga – visų sąveikaujančių bangų poliarizacija tos pačios krypties.
- d_{33} koeficiento reguliavimas – kristalo feroelektrinių domenų poliarizacijos krypties keitimas periodu Λ ;
- Tai keičia netiesinio koeficiento d_{ef} ženklą.

POLN gamyba

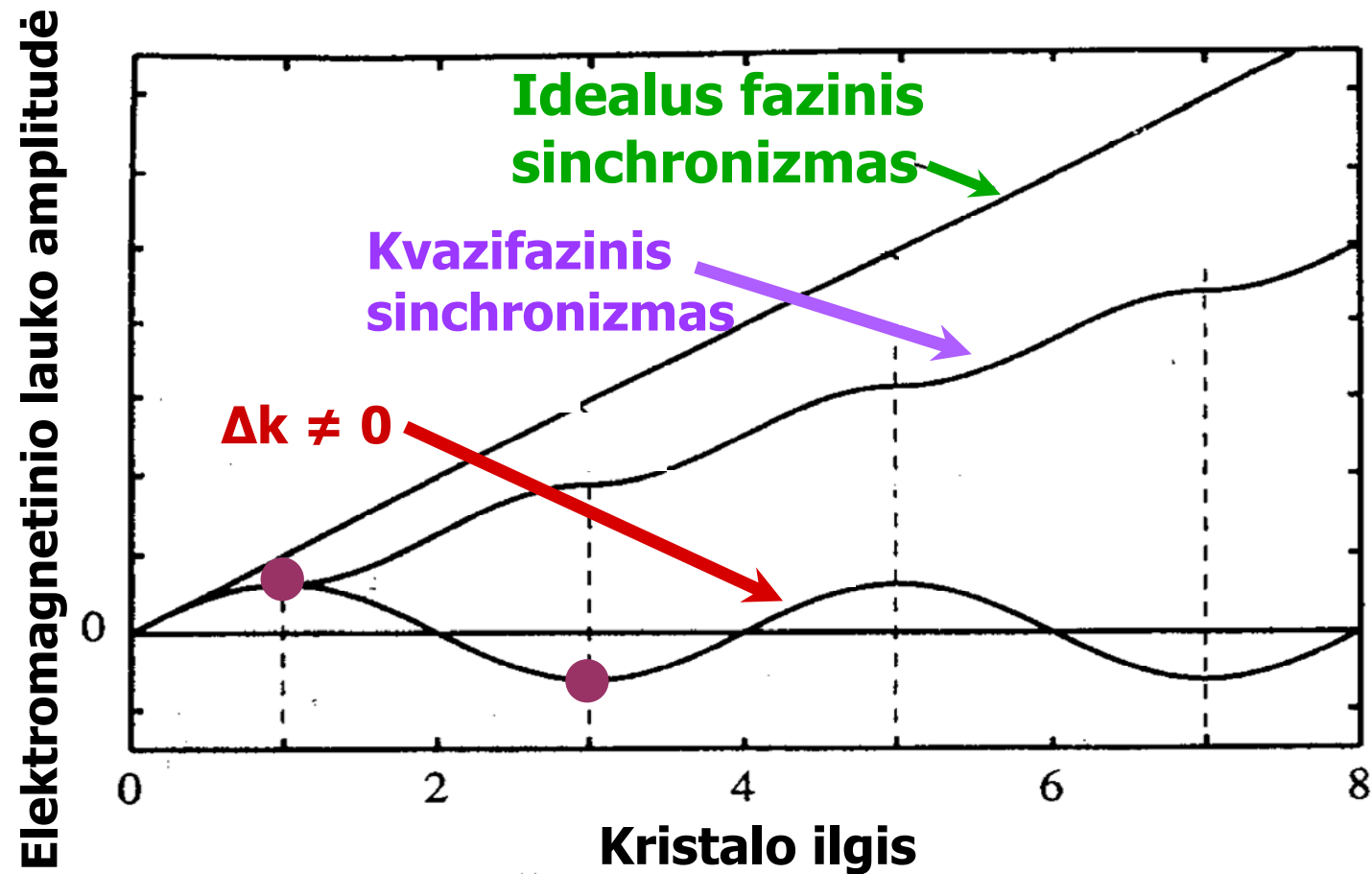


Kristalo poliarizacija
keičiama periodu Λ

- Kristalo paviršius veikiamas ilgais siaurais metaliniais elektrodais;
- Statinis elektrinis laukas (**21 kV/mm**) po elektrodu apverčia feroelektrinius domenus.

Yamada et al. (1993)

Kvazifazinis sinchronizmas



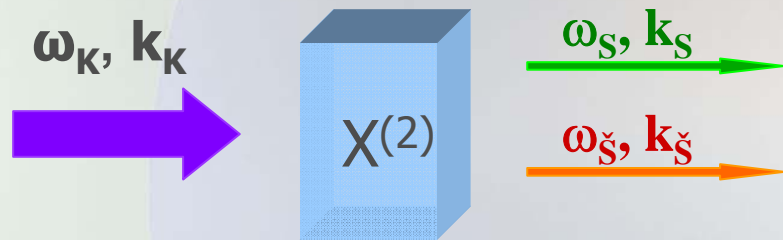
- Periodinis d_{ef} ženklų kitimas kompensuoja fazių skirtumą $\neq 0$
- koherentiškas ilgis (kai $\Delta k \neq 0$ fazė pakinta per π)

Pranešimo planas

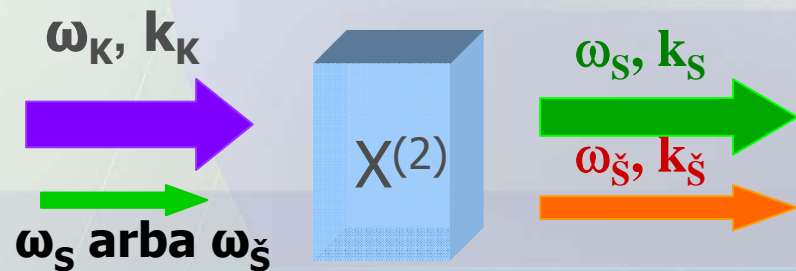
- Įvadas
 - **PŠP apibrėžimas;**
 - **Istorija.**
- **Pagrindiniai principai:**
 - **2 eilės netiesiškumo $\chi^{(2)}$;**
 - **(Kvazi)Fazinio sinchronizmo sąlygos;**
 - **Spinduliuotės derinimas.**
- **PŠP:**
 - **Parametriniai šviesos generatoriai;**
 - **Parametriniai šviesos stiprintuvai;**
 - **Parametriniai rezonuojantys šviesos generatoriai.**
- **PŠP pritaikymai.**

PŠP skirstomi

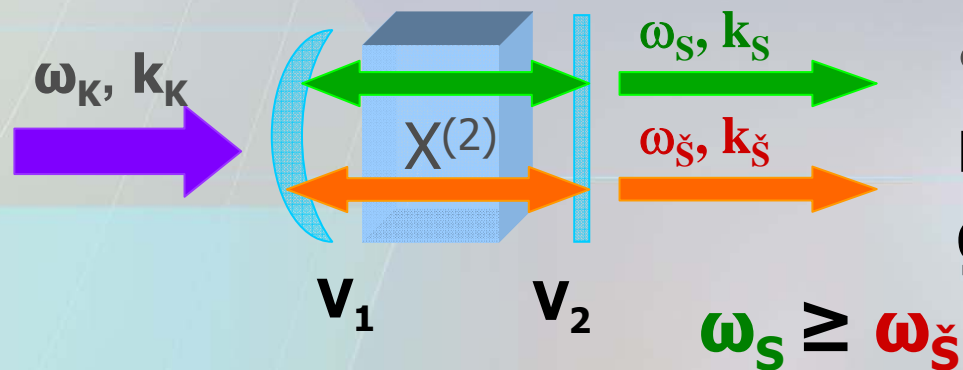
PŠP



• Parametrinis šviesos generatorius (PŠG);

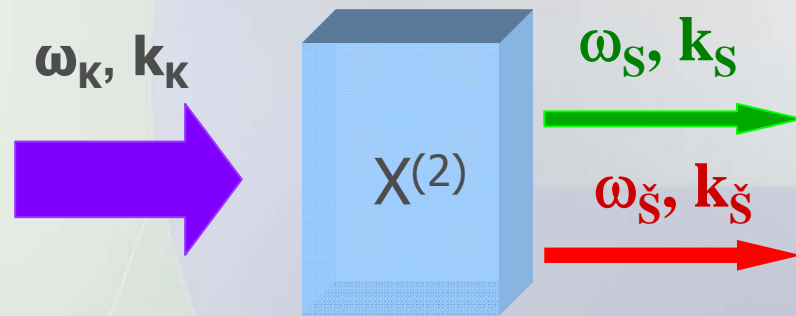


• Parametrinis šviesos stiprintuvas (PŠS);



• Parametrinis rezonuojantis šviesos generatorius (PRŠG).

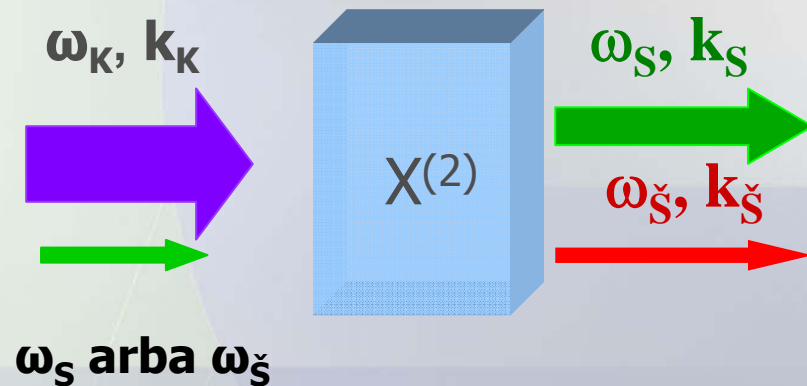
Parametrinis šviesos generatorius



- Netiesinis optinis procesas prasideda dėl mažo intensyvumo spontaniškos parametrinės emisijos (triukšmų, fluorescencijos);

Sukurtos signalinės, šalutinės bangos intensyvumas gali būti padidintas parametriniu šviesos stiprintuvu (PŠS).

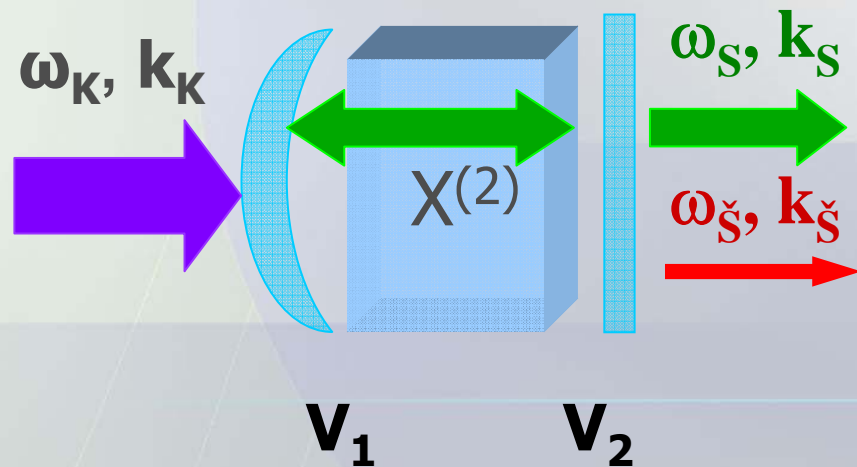
Parametrinis šviesos stiprintuvas



- Signalinė banga sustiprinama, tuo pačiu metu sukuriama šalutinė banga.

Dažniausiai naudojama kai parametriniu rezonuojančiu šviesos generatoriumi (PRŠG) gaunama per maža energija.

Parametrinis rezonuojantis šviesos generatorius

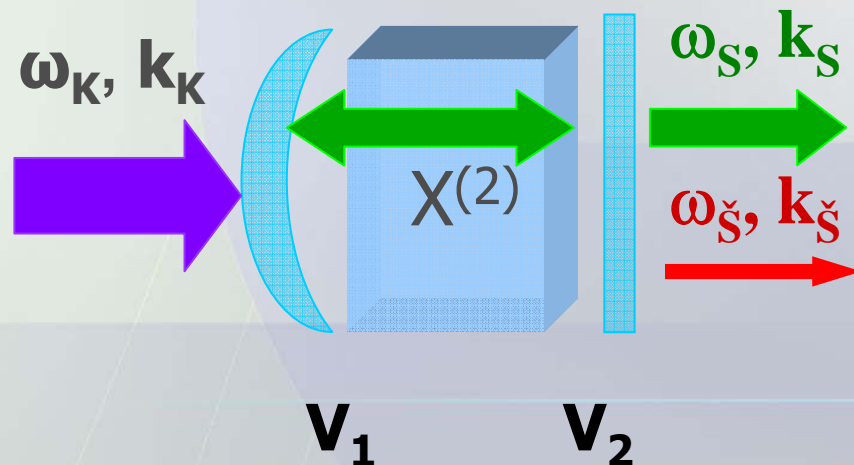


Spektrinės linijos plotis didesnis arti ypatingo taško, kai $\omega_S = \omega_{\check{s}}$

- Efektyvus spinduliuotės derinimo prietaisas;
- Signalas stiprinamas dėl rezonatoriaus;
- Jei nėra papildomų komponentų, signalinės/ šalutinės bangos spektro linijos plotis platus;

Parametrinis rezonuojantis šviesos generatorius

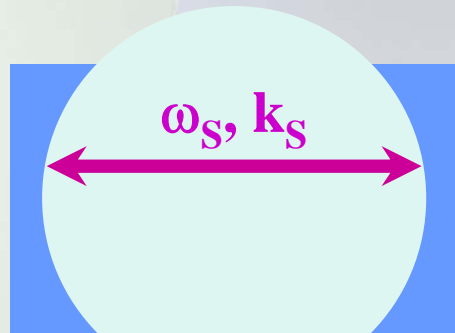
Vienbangis generatorius



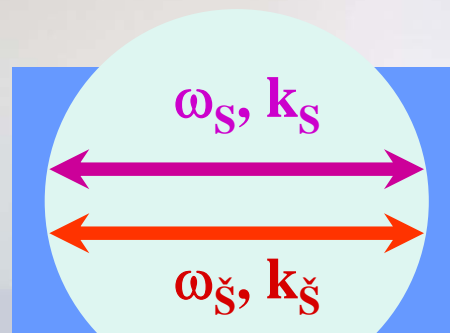
- pralaidus kaupinimo spinduliuotei;
- atspindintis signalinę

- 80-90% atspindintis signalinę bangą;
- pralaidus kaupinimo, šalutinei bangai.

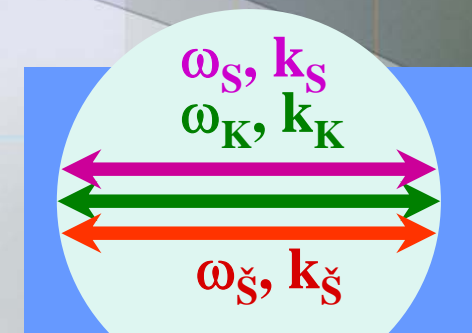
Parametrinis rezonuojantis šviesos generatorius



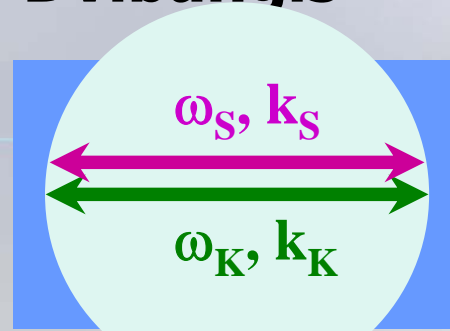
Vienbangis



Dvibanqis



Tribangis



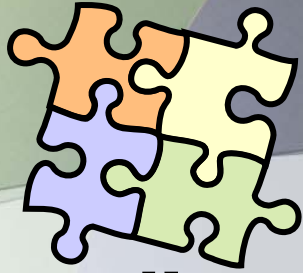
Gražinamo kaupinimo

Slenkstis

Sistemos sudėtingumas

Parametrinis rezonuojantis šviesos generatorius

- Nuolatinės veikos;
- Impulsinio kaupinimo (nanosekundiniu impulsu ns);
- Ultra trumpo impulso kaupinimo (piko-, femtosekundiniu impulsu ps, fs)



Problema 1

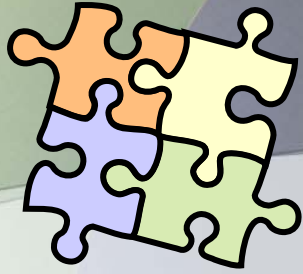
- Naudingumas priklauso nuo impulso galios tankio -

Sunkumai su nuolatinės veikos PRŠG

- Dvibangio PRŠG privalumas – žemas parametrinės generacijos slenkstis;
- Bandomi **dvibangiai nuolatinės veikos PRŠG** – nepakanka gaunamos spinduliuotės galios ir derinimo;
- Menkas susidomėjimas nuolatinės veikos PRŠG.

Džiaugsmai

- **Kaupinant ns impulsu, naudingumas priklauso nuo impulso kokybės ir galios;**
- **Šviesa nukeliauja $\approx 3\text{m}$ per 10 ns.**
- **Jei kristalas 10 cm, tai 15 šviesos apėjimų rezonuojančioje ertmėje – užtenka.**



Problema 2

Kaupinimas ultra trumpu impulsu

- Vieno ps, fs impulso neužtenka sukurti signalinei, šalutinei bangai.
- Šviesa nusklinda $\approx 0,3$ mm per 1 ps.
Kristalo ilgis turėtų būti $< 0,3$; fs impulsui – dar trim eilėm trumpesnis;



Praktiškai neįmanoma.

Problemos 2 sprendimas - Sinchroninis kaupinimas

- Daug ultragreitų impulsų nuosekliai sąveikauja su vienetiniu ω_S ; $\omega_{\check{S}}$ impulsu rezonatoriuje.
- Impulsų pasikartojimo dažnumas turi sutapti su ω_S ; $\omega_{\check{S}}$ dažniu;
- ω_K ; ω_S ; $\omega_{\check{S}}$ skirtingi grupiniai greičiai;
- Jei impulsas 100 fs, bangos išsiskiria nukeliavusios 1-10 mm.

Parametrinė generacijos slenkstis – stiprinimas susilygina su nuostoliais

Vienbangio PRŠG slenkstinė sąlyga:

$$g^2 l^2 = 2\sqrt{1 - R_s} (1 - L)$$

g – stiprinimo koef. $\sim d_{eff} \sqrt{\omega_s \omega_{\check{s}} I / (n_s n_{\check{s}})}$
 l – $\chi^{(2)}$ terpės ilgis,
 R_s – išėjimo veidrodžio atspindžio koef.,
 L – atspindžio, sugerties nuostoliai.

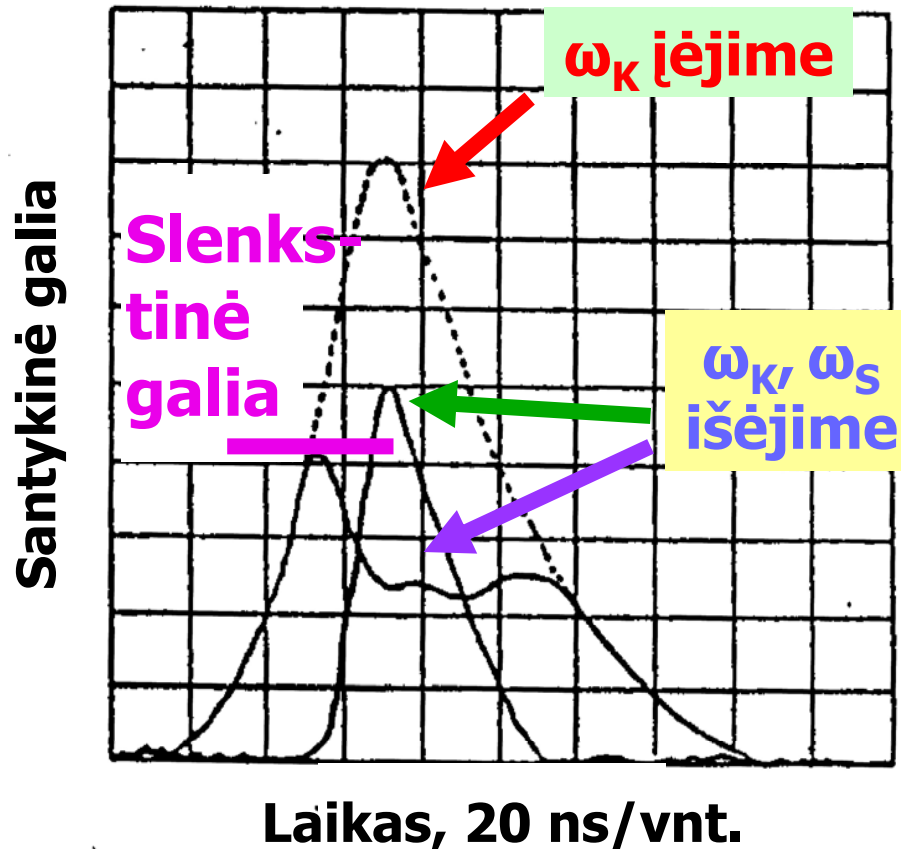
Parametrinės generacijos slenkstis

Mažina

- Ilgesnis impulsas, trumpesnis rezonatorius;
- Terpės didesnis netiesiškumas;
- Kaupinimo bangos kokybė (stabilumas, TEM₀₀) intensyvumas (svarbiau negu impulso energija);
- ω_K bangos dvigubas kelias kristalu;
- Rezonatorius su įgaubtais veidrodžiais, lyginant su plokščiais sumažina \approx dvigubai;

Didesnis PŠP efektyvumas

Parametrinės generacijos slenkstis



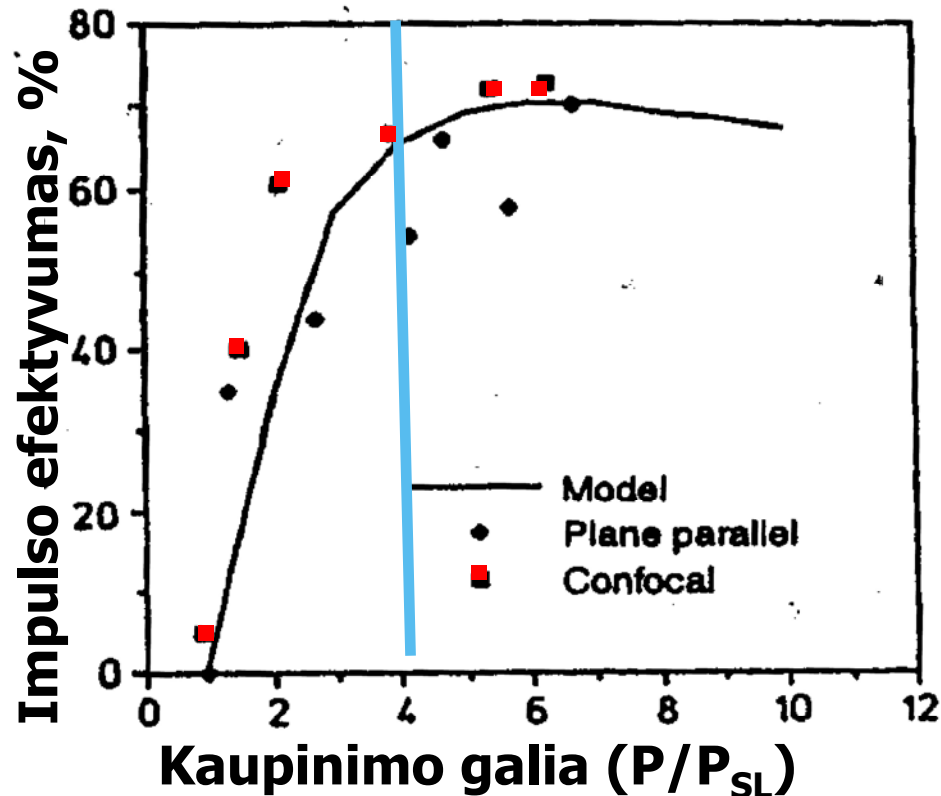
- Slenksčio pasiekimo laikas:

$$m/t$$

m -svyravimų sk. rezonatoriuje, t -laikas, reikalingas stiprinimui;

- pasiekus slenkstį, kaupinimo impulsas išeikvojamas signalinės, šalutinės bangos fotonų sukūrimui.

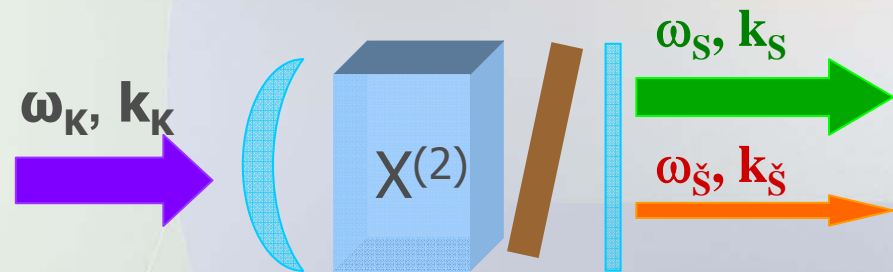
PRŠG efektyvumas



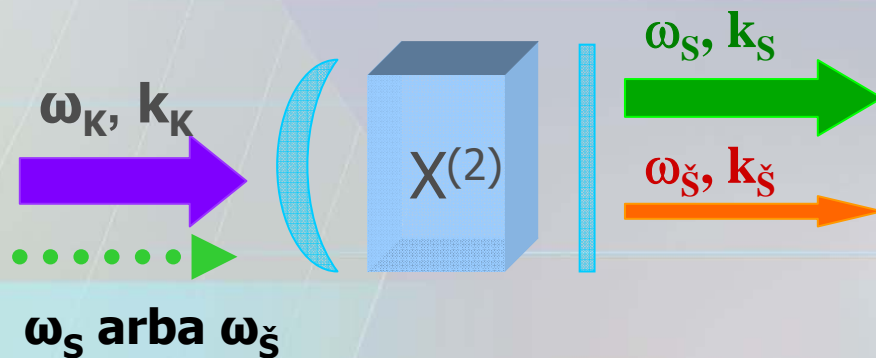
- Iš eksperimentų ir teorinių modelių –

Bendra “Nykščio taisyklė” – kaupinimo galia turi bent 4 kartus viršyti slenkstinę galios vertę, kad būtų pasiektas didžiausias efektyvumas.

Siauresnis spektro linijos plotis



- PRŠG su derinimo elementu viduje rezonatoriaus (etalonai) $0,1\text{cm}^{-1}$;



- PRŠG su "užkratu", papildoma kaupinimui spinduliuote, $0,2\text{cm}^{-1}$.

Pranešimo planas

- Įvadas
 - **PŠP apibrėžimas;**
 - **Istorija.**
- **Pagrindiniai principai:**
 - **2 eilės netiesiškumo $\chi^{(2)}$;**
 - **(Kvazi)Fazinio sinchronizmo sąlygos;**
 - **Spinduliuotės derinimas.**
- **PŠP:**
 - **Parametriniai šviesos generatoriai;**
 - **Parametriniai šviesos stiprintuvai;**
 - **Parametriniai rezonuojantys šviesos generatoriai.**
- **PŠP pritaikymai.**

Pritaikymai

nuolatinės veikos

- Nuolatinės veikos PŠP įdomiausi kaip infraraudonosios spinduliuotės šaltiniai;
- Virpesinė kondensuotos fazės molekulių spektroskopija, nereikia siauro spektrinės linijos pločio;
- Sugerties, foto-akustinė, koherentinė atomų spektroskopija.

Pritaikymai

ns kaupinimo režimas

- **Molekulių spektroskopija:**
 - HCl virpesiniams lygmenims; $>3,5 \mu\text{m}$;
 - H₂O garų spektras infraraudonojoje srityje, panaudojus ZnGeP₂, 3,7-8 μm , kaupinant 2-3 μm ;
- **Atomų spektroskopija – UV srityje;**
- **Koherentinė anti – Stoksinė Ramano spektroskopija:**
 - sinchroniškai panaudojama signalinė ir šalutinė bangos, šalutinė - kalibravimui;
 - gautas benzeno, deguonies, azoto dujų mišinio spektras.

Pritaikymai

ns kaupinimo režimu

- **Panaudojamas net platus PŠP spektro plotis:**
 - sukuriama plačiajuostė spinduliuotė, kad būtų gaunamas azoto, deguonies spektras ore.
- **Atmosferos, ozono sluoksnio tyrimai;**

Pritaikymai

ultratrumpas kaupinimo režimas



- **Fotosintezės, molekulių fotodisociacijos, fotojonizacijos tyrimai; daug svarbių procesų biologijoje, medicinoje vyksta per ps, fs trukmę;**
- **Platus, tolygus PŠP spinduliuotės intervalas leidžia identifikuoti kiekvieną molekulę.**

Apibendrinimas

- **PŠP – dažnio keitimo įrenginiai, priklausantys nuo kaupinimo bangos ilgio, intensyvumo, galios ir pluošto kokybės;**
- **Galima reguliuoti PŠP spektrinės linijos plotį;**
- **Kaupinimo spinduliuotė gali būti nuolatinės veikos; ns, ps, fs impulsų;**
- **Spektroskopiniams tyrimams galima panaudoti tolygiai kintamą bangų ilgio intervalą net iki $\approx 14 \mu\text{m}$;**
- **Norima pasiekti dar kelis kartus už $14 \mu\text{m}$ ilgesnį bangos ilgį.**