

Фазовый синхронизм (Phase matching)

Право на глупость – одна из гарантий
свободного развития личности.

Марк Твен



Одноосные кристаллы

$$n_x = n_y < n_z$$

Типы взаимодействия

$$\dot{D}_i(\omega_3) = E_i(\omega_3) + \sum_j \chi_{ij}^{(1)} E_j(\omega_3) + 1/2 \sum_j \sum_k \chi_{ijk}^{(2)} \dot{E}_j(\omega_1) \dot{E}_k(\omega_2)$$

$$\dot{P}_{\text{нел},i}(\omega_3) = 1/2 \sum_j \sum_k \chi_{ijk}^{(2)} \dot{E}_j(\omega_1) \dot{E}_k(\omega_2)$$

$$i, j, k \rightarrow x, y, z$$

Условие фазового синхронизма: $\Delta \bar{k} = \bar{k}_3 - \bar{k}_2 - \bar{k}_1 = 0$

$$\Delta k = \frac{2\pi}{\lambda_3} n_3(\lambda_3, \theta) - \frac{2\pi}{\lambda_2} n_2(\lambda_2, \theta) - \frac{2\pi}{\lambda_1} n_1(\lambda_1, \theta) = 0 \quad \text{Коллинеарное взаимодействие}$$

$$\omega_3 n_3(\lambda_3, \theta) - \omega_2 n_2(\lambda_2, \theta) - \omega_1 n_1(\lambda_1, \theta) = 0$$

$$\omega_3 = \omega_2 + \omega_1 \quad h\omega_3 = h\omega_2 + h\omega_1 \quad Nh\omega_3 = Nh\omega_2 + Nh\omega_1 \quad \mathfrak{E}_3 = \mathfrak{E}_2 + \mathfrak{E}_1$$

Генерация второй гармоники: $\lambda_1 = \lambda_2, \lambda_3 = \lambda_1 / 2$

Генерация второй гармоники (ГВГ) - оое

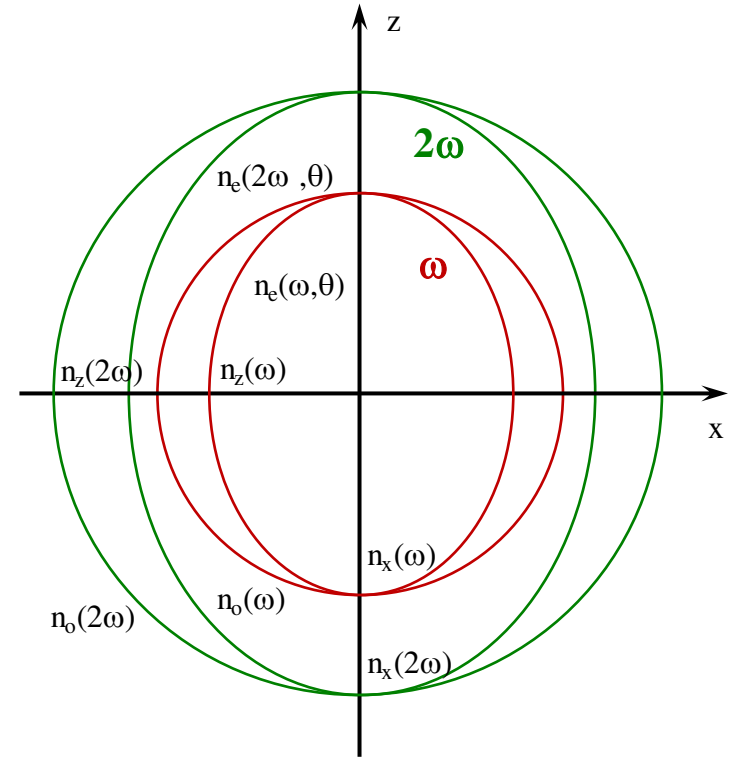
$$\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda, \quad \lambda_3 = \lambda/2$$

$$\Delta k = k_2 - 2k_1 = 0$$

$$\Delta k = \frac{2\pi}{\lambda/2} n_2(\lambda/2, \theta) - 2 \frac{2\pi}{\lambda} n_1(\lambda, \theta) = 0$$

$$n_2(\lambda/2, \theta) = n_1(\lambda, \theta)$$

$$v_{ph,2}(\lambda/2, \theta) = v_{ph,1}(\lambda, \theta)$$



Отрицательные кристаллы ($n_z < n_x = n_y$)

Возможно появление для: **о-волны с λ** и **е-волны с $\lambda/2$** при $\theta = 90^\circ$.

$$n_{2,e}(\lambda/2) = n_{1,o}(\lambda)$$

оо-е (оое) тип взаимодействия:

$$E_1(\lambda) = E_{1,o}(\lambda) - \text{о}, \quad E_2(\lambda) = E_{2,o}(\lambda) - \text{о}, \quad E_3(\lambda/2) = E_{3,e}(\lambda/2) - \text{е}$$

Правило индексов

Индексы: Нелинейные восприимчивости (χ_{ijk}) $i(\omega_3) \leftarrow j(\omega_1), k(\omega_2)$

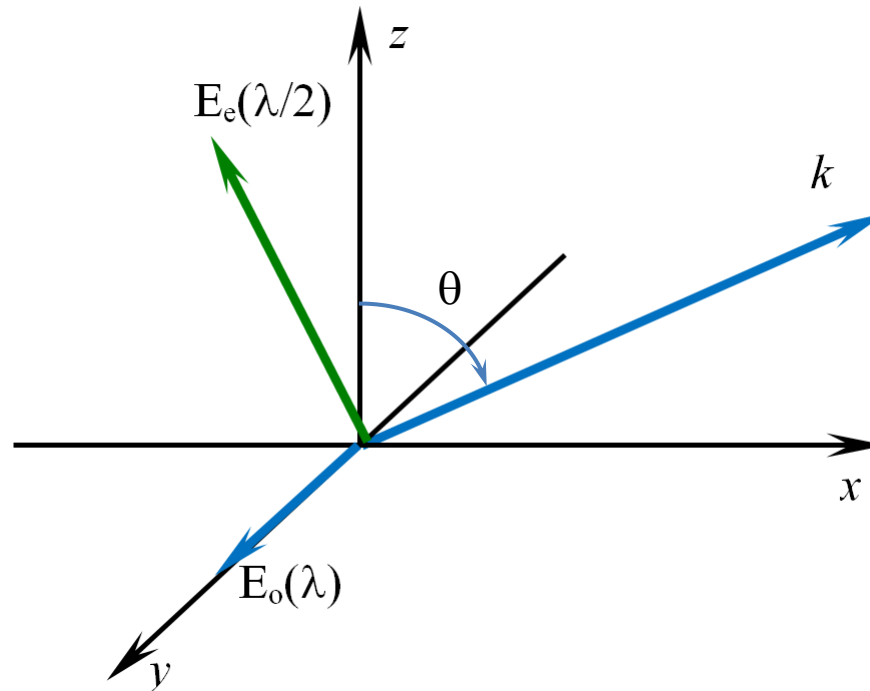
Индексы: Показатели преломления (одноосные n_o, n_e , двухосные n_s, n_f)

Одноосные	
Отрицательные	Положительные
ооо: $o(\omega_1) + o(\omega_2) \rightarrow e(\omega_3)$	еео: $e(\omega_1) + e(\omega_2) \rightarrow o(\omega_3)$
оее: $o(\omega_1) + e(\omega_2) \rightarrow e(\omega_3)$	оео: $o(\omega_1) + e(\omega_2) \rightarrow o(\omega_3)$
еое: $e(\omega_1) + o(\omega_2) \rightarrow e(\omega_3)$	еоо: $e(\omega_1) + o(\omega_2) \rightarrow o(\omega_3)$
Двухосные	
ssf: $s(\omega_1) + s(\omega_2) \rightarrow f(\omega_3)$	
fsf: $f(\omega_1) + s(\omega_2) \rightarrow f(\omega_3)$	
sff: $s(\omega_1) + f(\omega_2) \rightarrow f(\omega_3)$	

Ориентации векторов

Отрицательные кристаллы

ооо тип взаимодействия



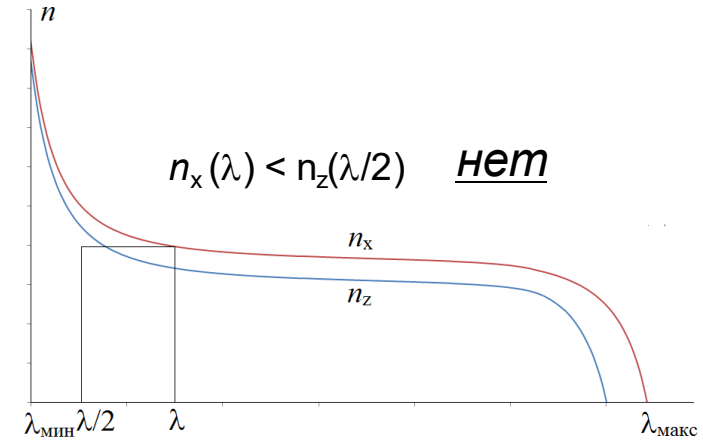
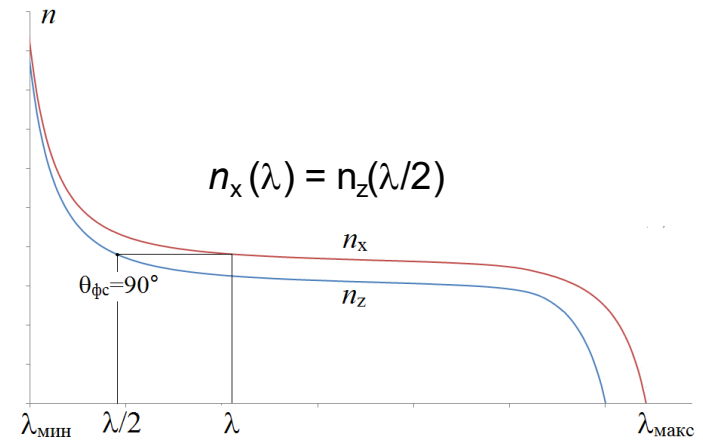
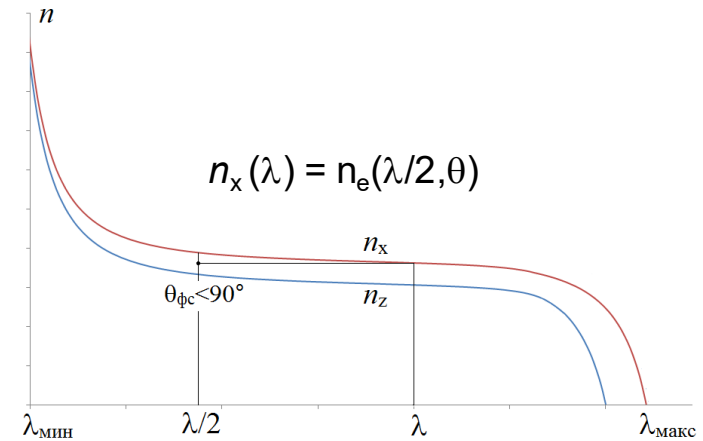
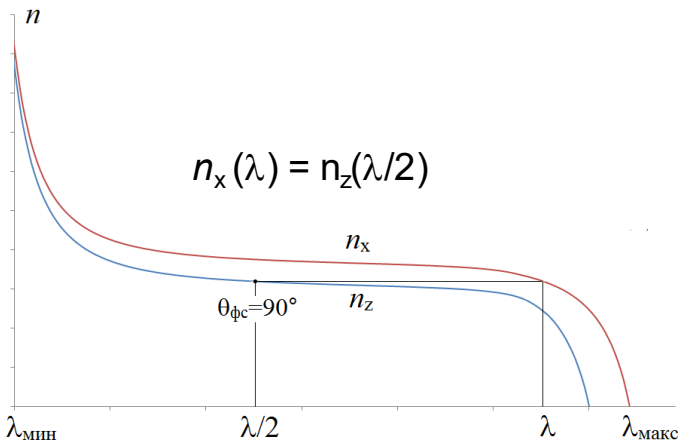
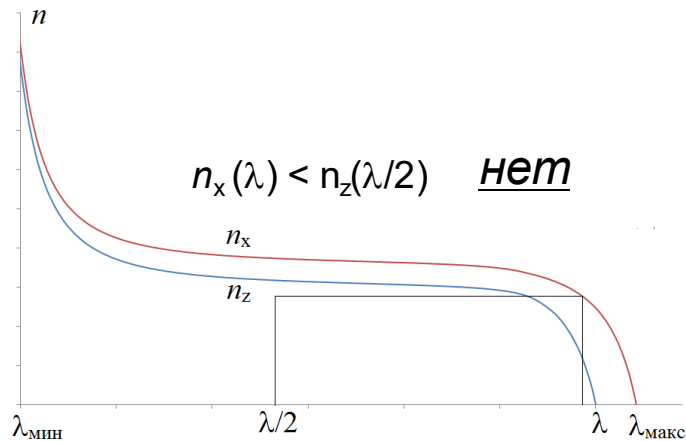
Дисперсионные зависимости

Отрицательные одноосные
кристаллы:

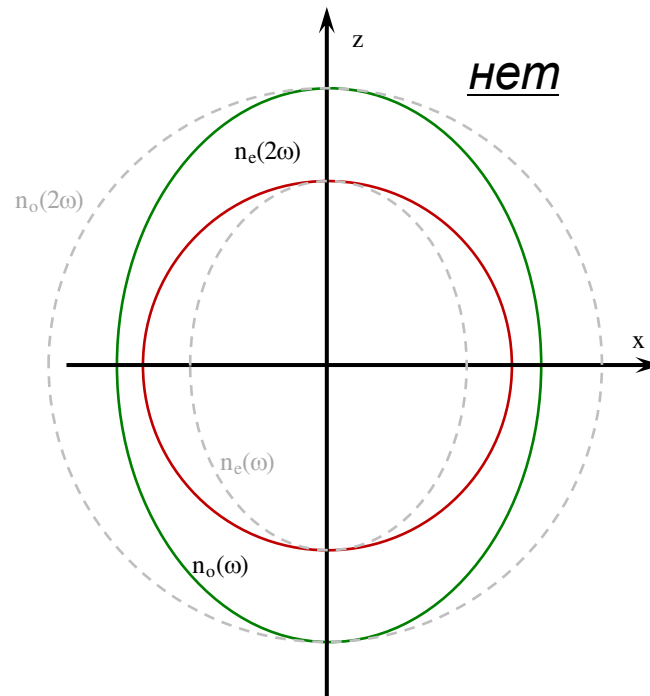
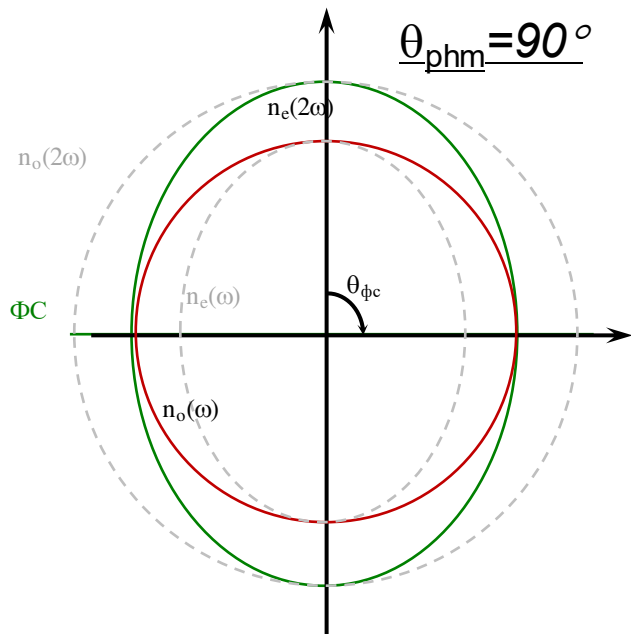
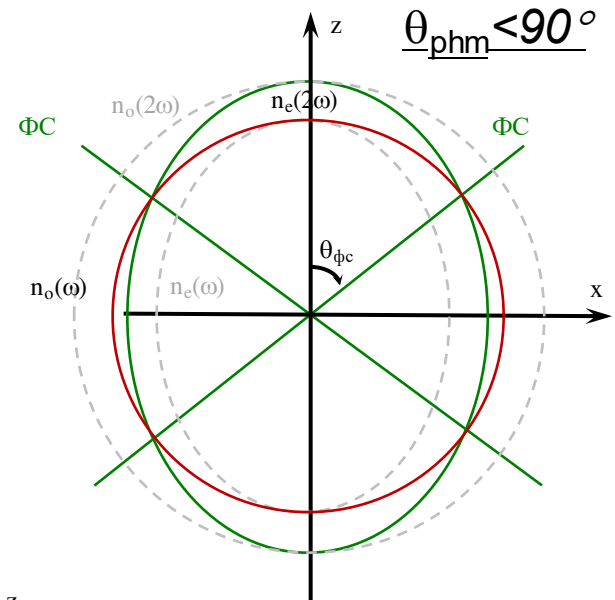
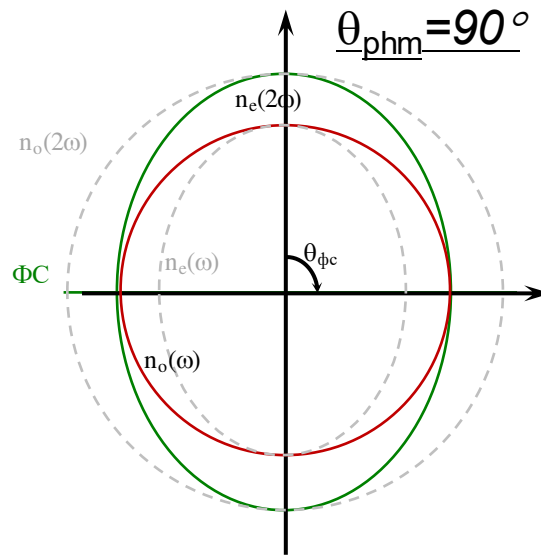
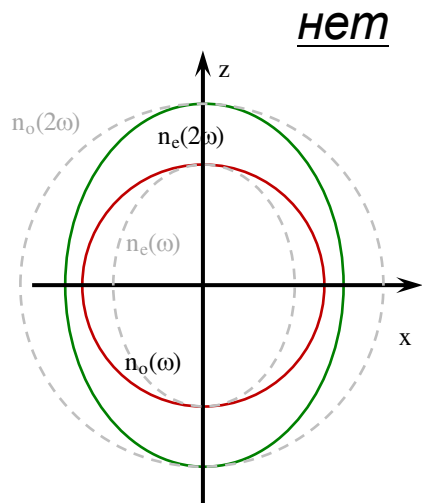
Генерация второй гармоники

ооо - тип взаимодействия

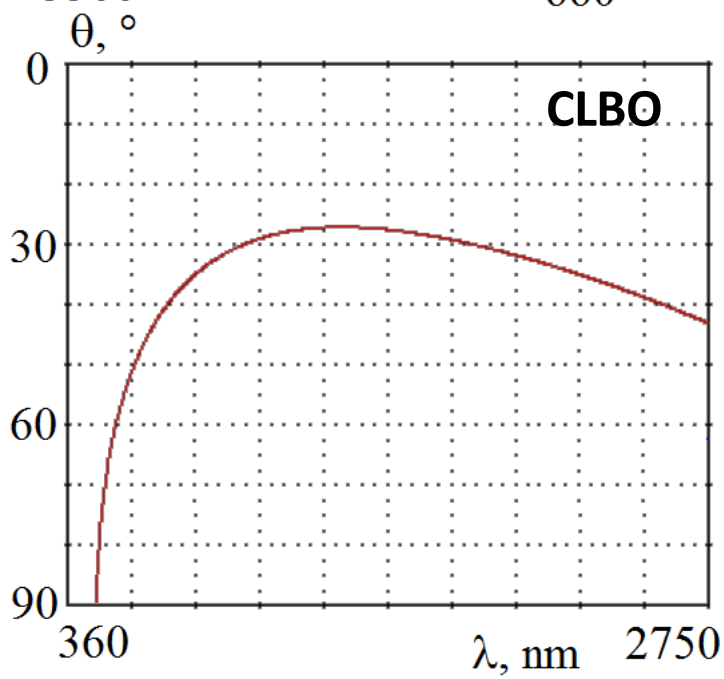
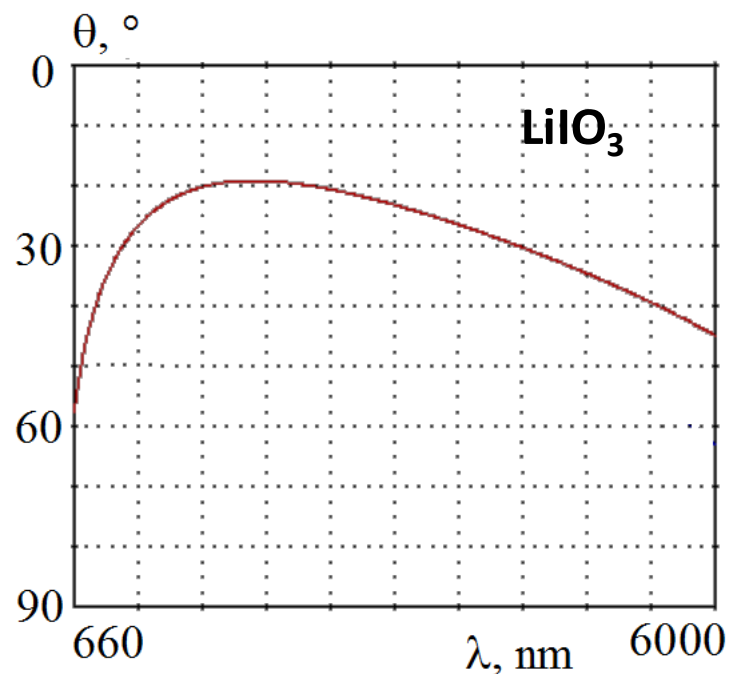
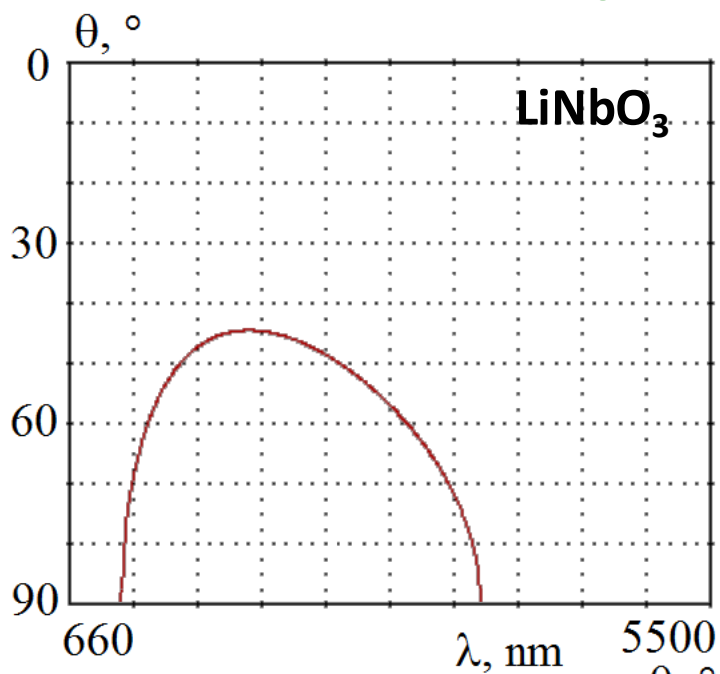
$$(n_e(\lambda/2, \theta) = n_o(\lambda) = n_x(\lambda))$$



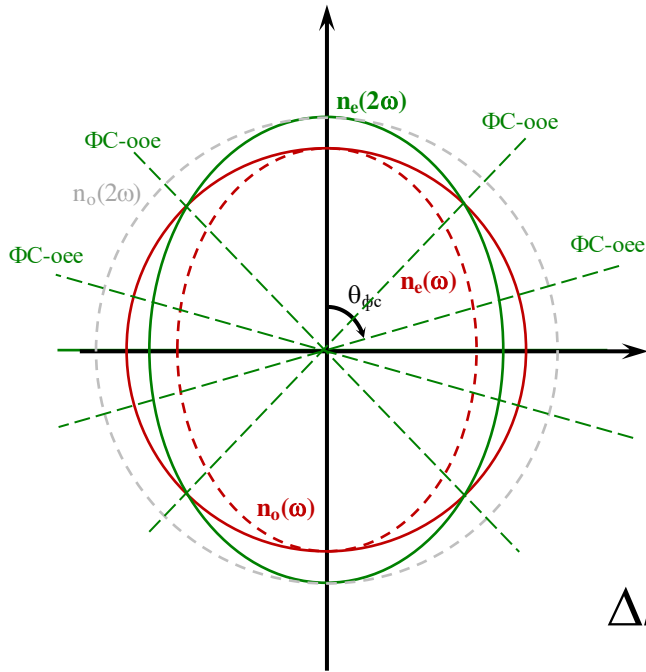
Характеристические поверхности - оое



Дисперсионные зависимости - оое



ОЕЕ тип взаимодействия



$$\Delta k = k_{2,e} - k_{1,o} - k_{1,e} = 0$$

$$\theta_{phm} (ooo) < \theta_{phm} (ooo)$$

$$\Delta k = \frac{2\pi}{\lambda/2} n_{2,e}(\lambda/2, \theta) - \frac{2\pi}{\lambda} n_{1,o}(\lambda) - \frac{2\pi}{\lambda} n_{1,e}(\lambda, \theta) = 0$$

$$n_{2,e}(\lambda/2, \theta) = \frac{n_{1,o}(\lambda) + n_{1,e}(\lambda, \theta)}{2}$$

оо-е (ооо) тип взаимодействия, или ео-е (еое)

$$\Phi C: \lambda_{\text{макс, ооо}} > \lambda_{\text{макс, ооо}}$$

$$\lambda_{\text{мин, ооо}} < \lambda_{\text{мин, ооо}}$$

Угол фазового синхронизма – генерация второй гармоники (ГВГ)

ооо: $n_{1,o}(\lambda) = n_{2,e}(\lambda/2)$

$$n_x(\lambda) = \frac{n_x(\lambda/2)n_z(\lambda/2)}{\sqrt{n_x^2(\lambda/2) + [n_z^2(\lambda/2) - n_x^2(\lambda/2)]\cos^2\theta}}$$

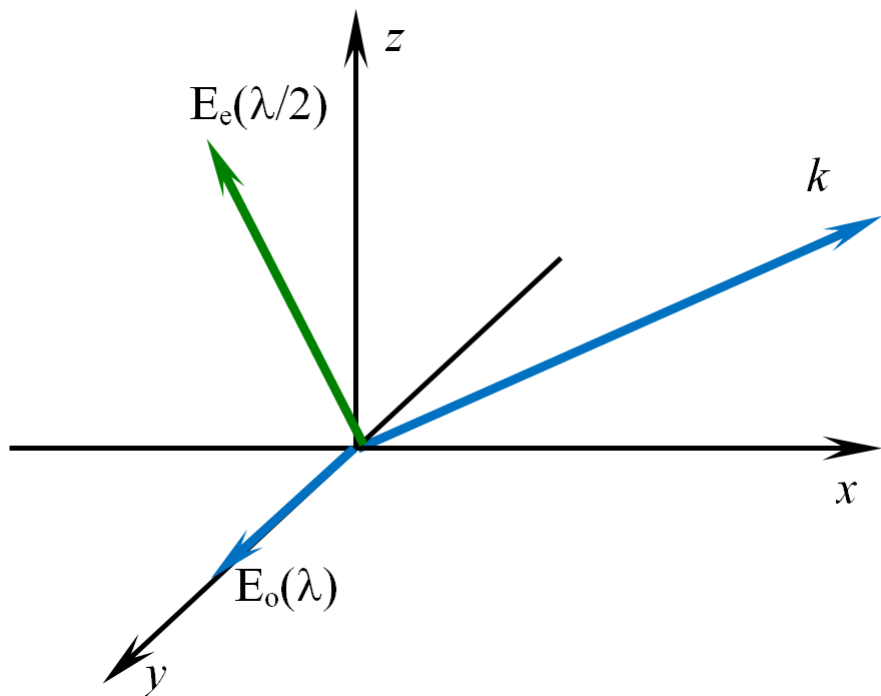
ооо: $[n_{1,o}(\lambda) + n_{1,e}(\lambda)] / 2 = n_{2,e}(\lambda/2)$

$$[n_x(\lambda) + \frac{n_x(\lambda)n_z(\lambda)}{\sqrt{n_x^2(\lambda) + [n_z^2(\lambda) - n_x^2(\lambda)]\cos^2\theta}}] / 2 = \frac{n_x(\lambda/2)n_z(\lambda/2)}{\sqrt{n_x^2(\lambda/2) + [n_z^2(\lambda/2) - n_x^2(\lambda/2)]\cos^2\theta}}$$

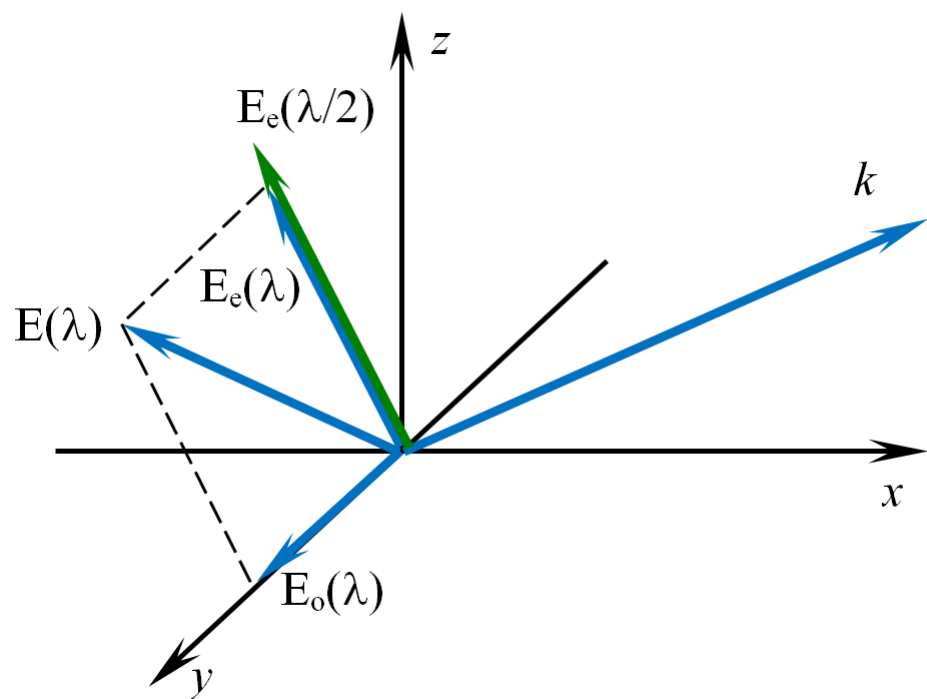
Ориентации векторов

Отрицательные кристаллы

ооо

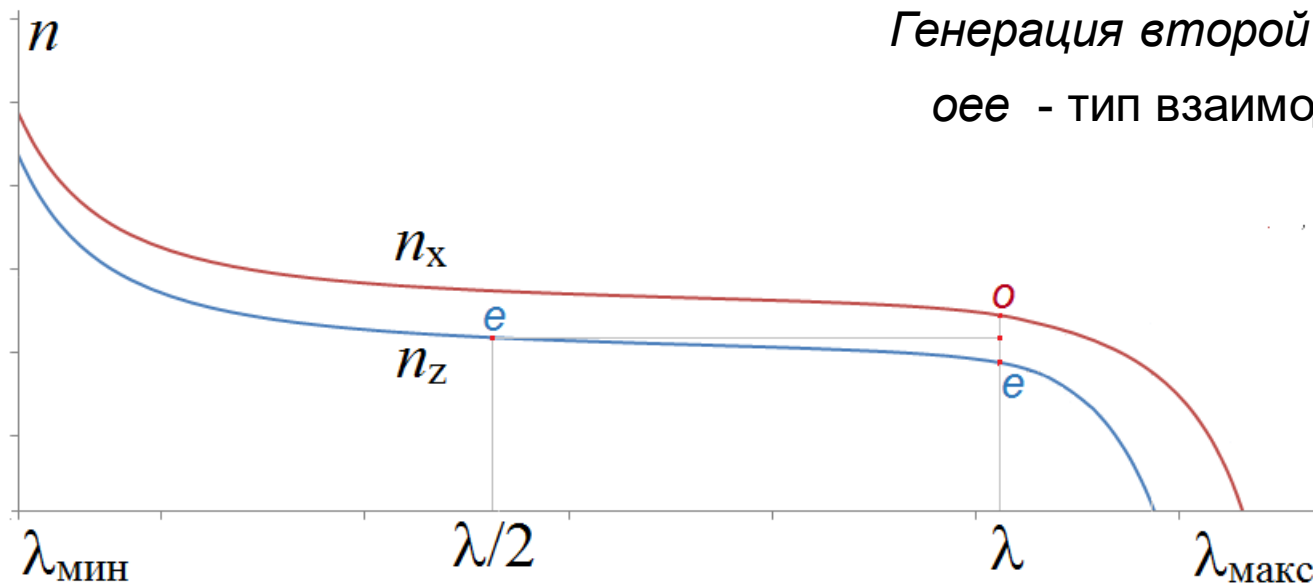


ооо = еое

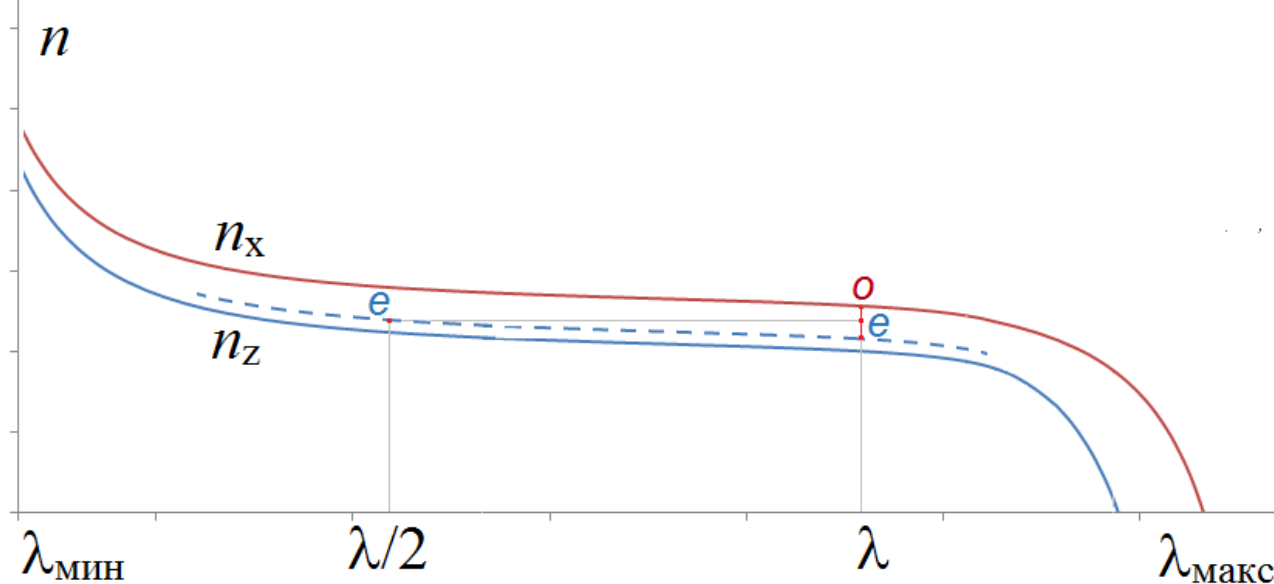


Дисперсионные зависимости - ое

Одноосные кристаллы:
Генерация второй гармоники
ооо - тип взаимодействия

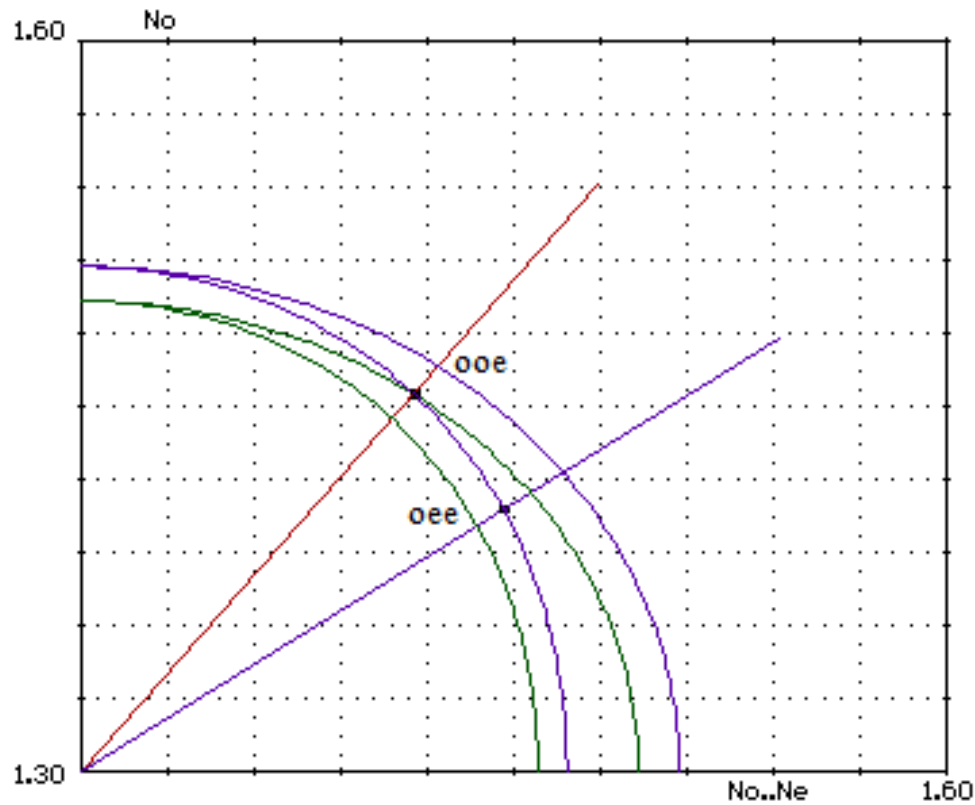


$\theta = 90^\circ$

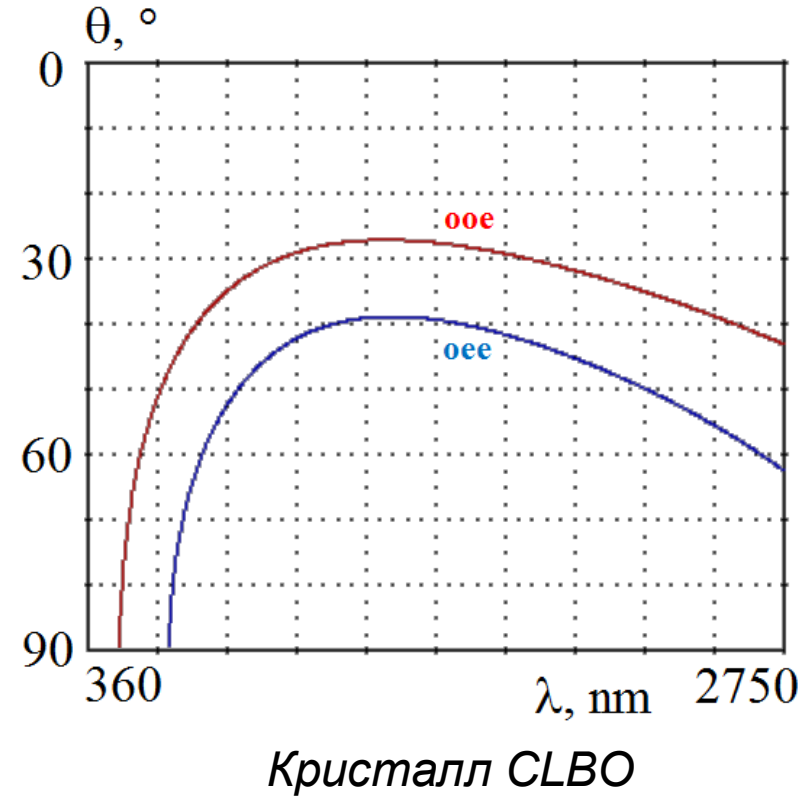


$0^\circ < \theta < 90^\circ$

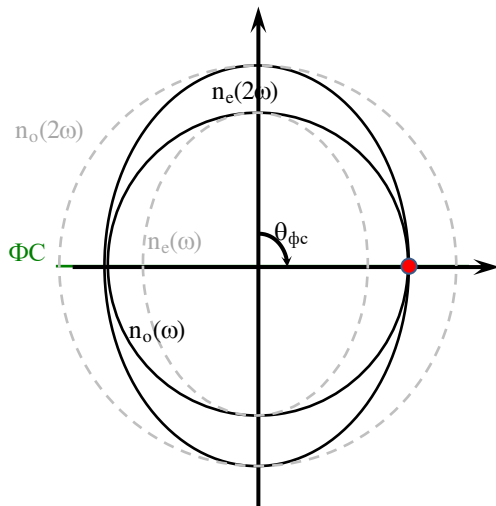
Дисперсионные зависимости ФС



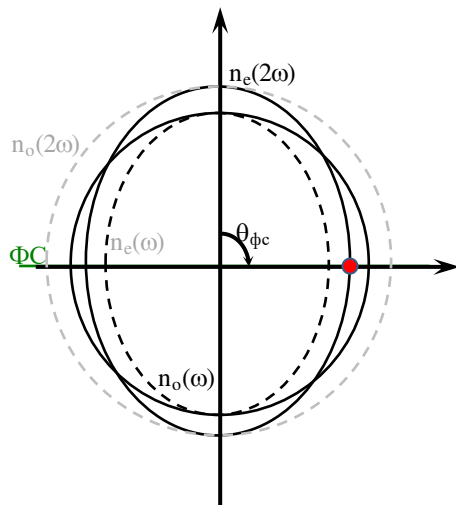
$$\theta_{phm} (oe) < \theta_{phm} (oe)$$



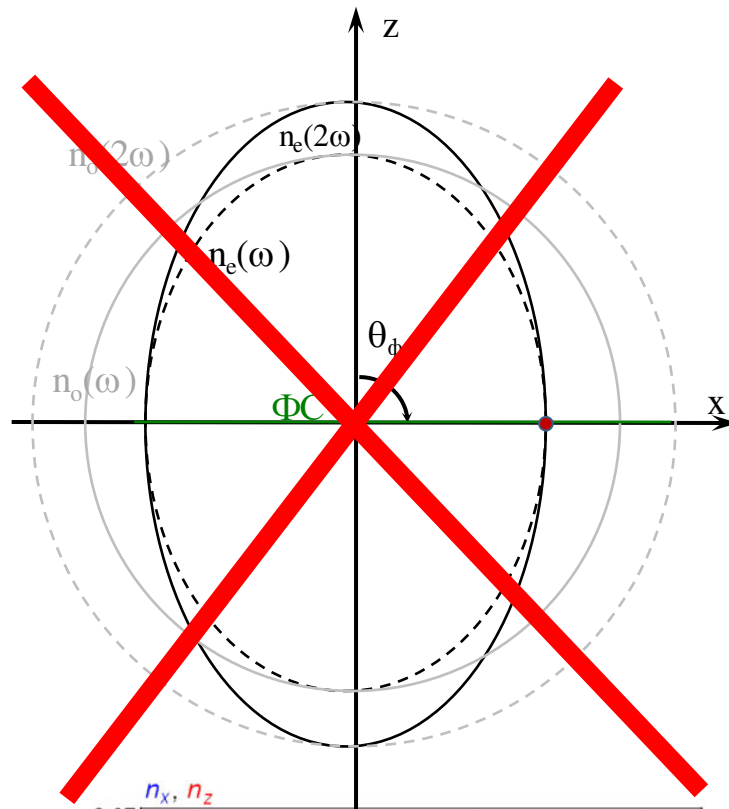
Типы синхронизма



oo-e (ooe)

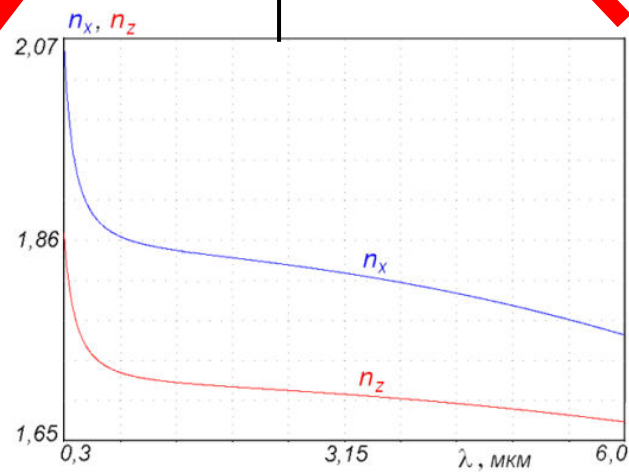


oe-e (oeo)



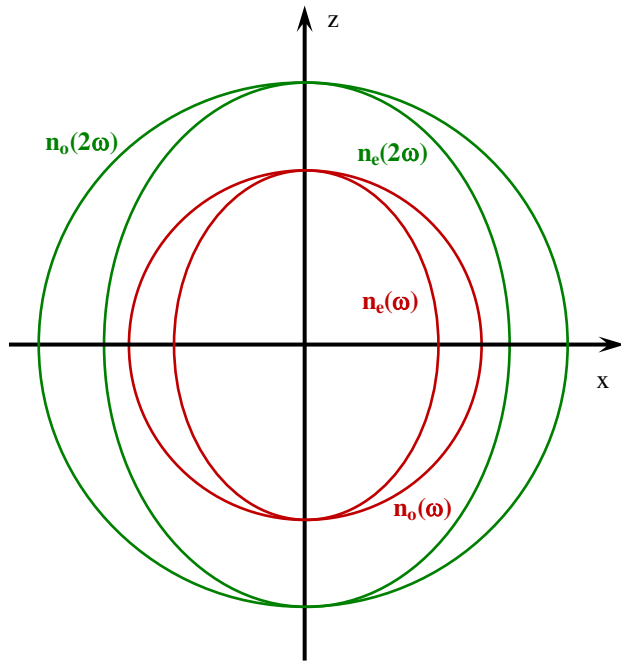
?

eee

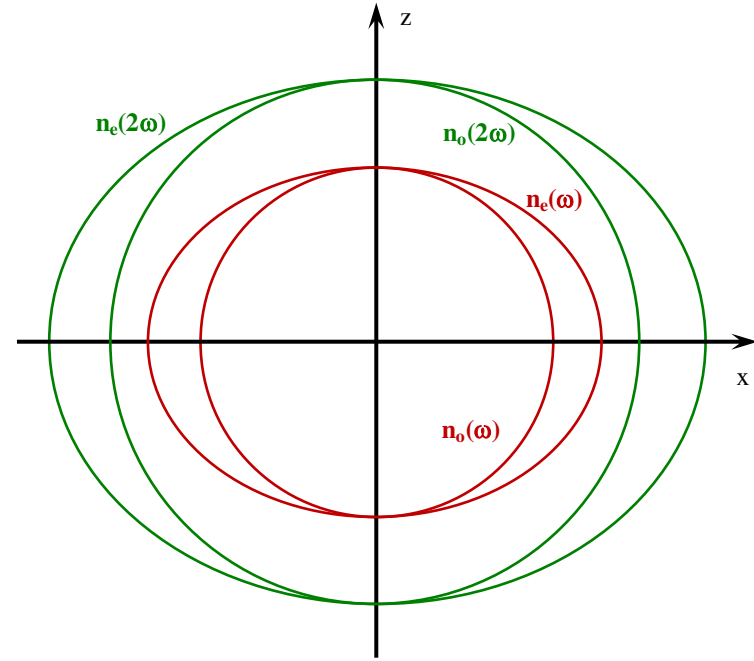


Запрещено дисперсией

Отрицательные и положительные кристаллы



Отрицательный



Положительный

1-й тип: $oo - e (ooe)$ \leftrightarrow $ee - o (eeo)$

2-й тип: $oe - e (oe e)$ \leftrightarrow $eo - o (eoo)$

$eo - e (oe e)$ \leftrightarrow $oe - o (oeo)$

Типы синхронизма (взаимодействия)

$$\lambda_1 \geq \lambda_2 > \lambda_3$$

Тип		Кристаллы
ооо	1-й тип	Отрицательные ($n_x < n_z$)
ооо	2-й тип	
еоо		
еео	1-й тип	Положительные ($n_x > n_z$)
еоо	2-й тип	
оео		
ooo		Невозможны из-за дисперсии среды
eee		

Для всех типов угол синхронизма: $0^\circ < \theta_{\text{фс}} \leq 90^\circ$

Для всех типов $\theta_{\text{фс}}$ не зависит от угла φ .

Одноосные кристаллы

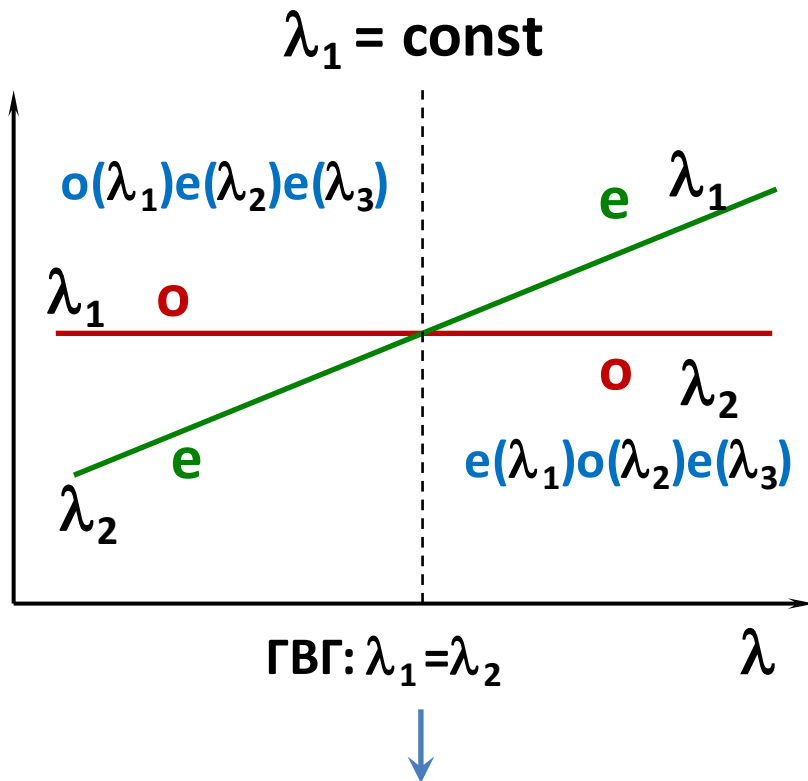
Кристалл	Отр./Пол	λ_{\min} , nm	Тип	λ_{phm}^{\min} , nm	λ_{phm}^{\max} , nm	λ_{\max} , nm
β -BBO	Отриц.	396	ооe	409,1	2600	2600
			оee	527,3	2600	
CDA	Отриц.	500	ооe	1063,4	1430	1430
			оee	-	-	
KDP	Отриц.	352	ооe	542,7	1500	1500
			оee	739,1	1500	
DKDP	Отриц.	400	ооe	529,4	2000	2000
			оee	739,1	2000	
LiNbO_3	Отриц.	660	ооe	1055,6	3754,1	5500
			оee	1688,2	2410,5	
Proustite (Прустит)	Отриц.	2400	ооe	$\theta=72^\circ$	13000	13000
			оee	1492,8	-	
Urea (Мочевина)	Полож.	800	ееo	473	1400	1400
			еоо	600	1400	
ZnGeP_2	Полож.	1480	ееo	3169,2	10320	12000
			еоо	-	-	

Связь синхронизмов типа oee и eoe

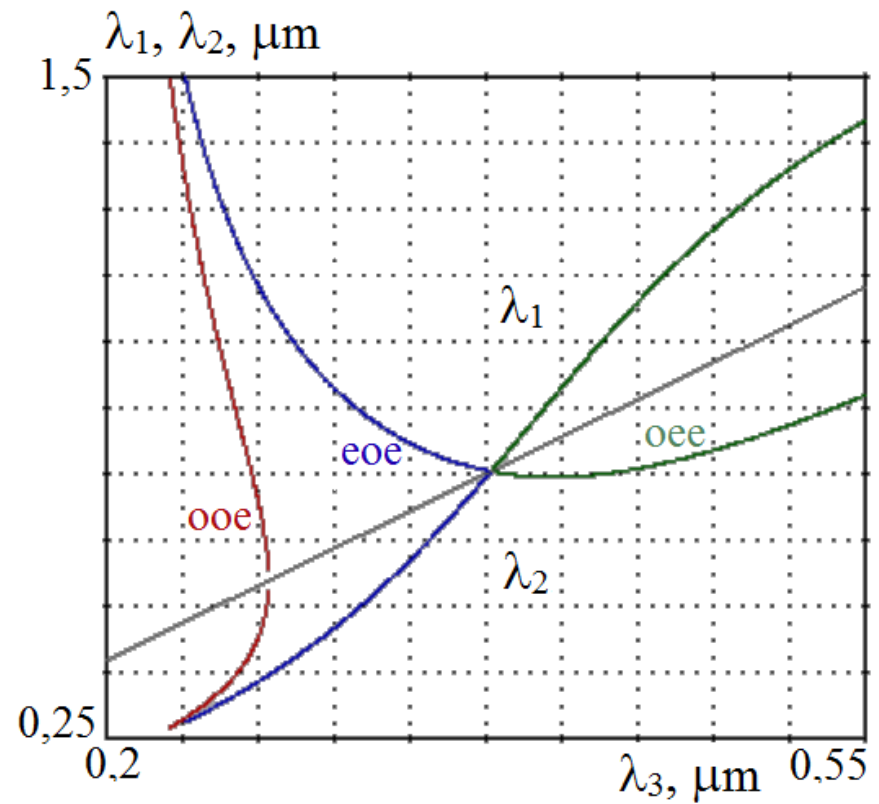
Отрицательный кристалл

2-й тип взаимодействия

$$\lambda_1 \geq \lambda_2 > \lambda_3$$



$$\text{o}(\lambda_1)\text{e}(\lambda_1)\text{e}(\lambda_3) = \text{e}(\lambda_1)\text{o}(\lambda_1)\text{e}(\lambda_3)$$

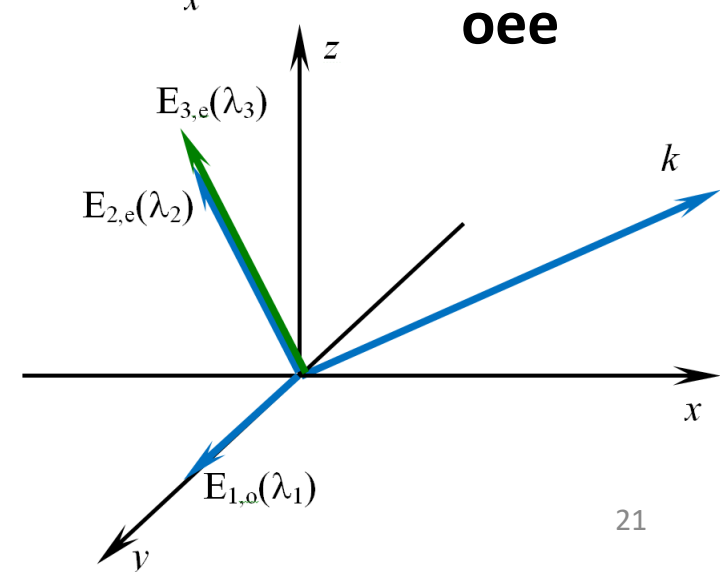
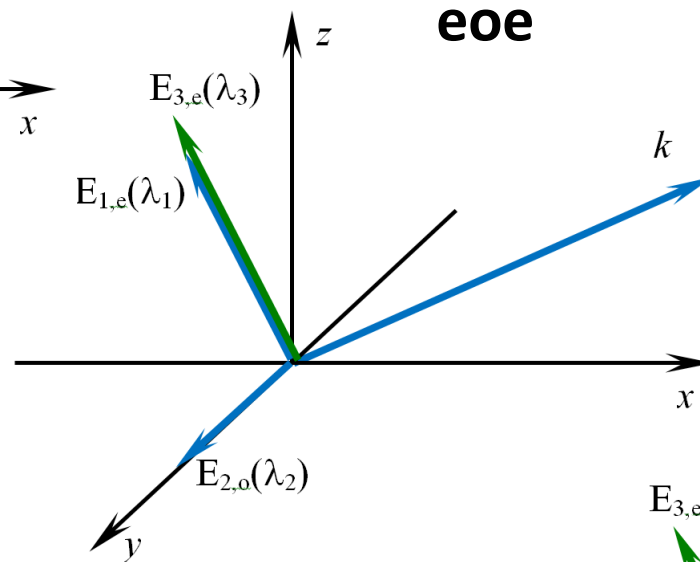
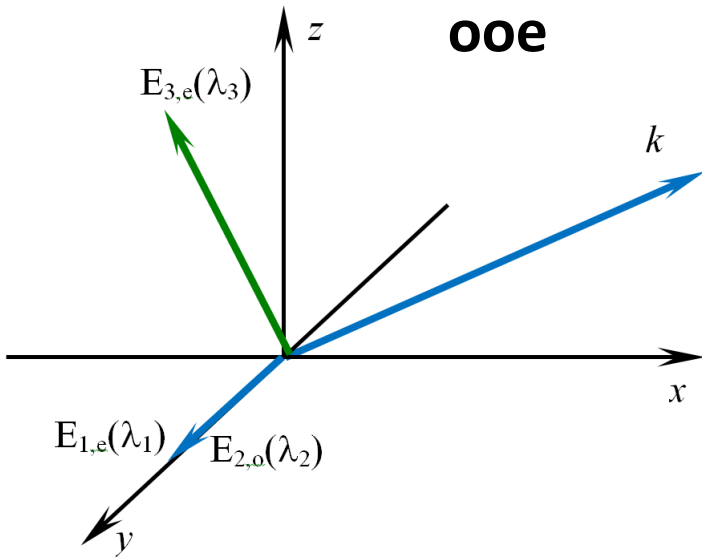


$$\theta = \text{const}$$

Ориентации векторов – генерация суммарных частот

$$\lambda_1 \geq \lambda_2 > \lambda_3$$

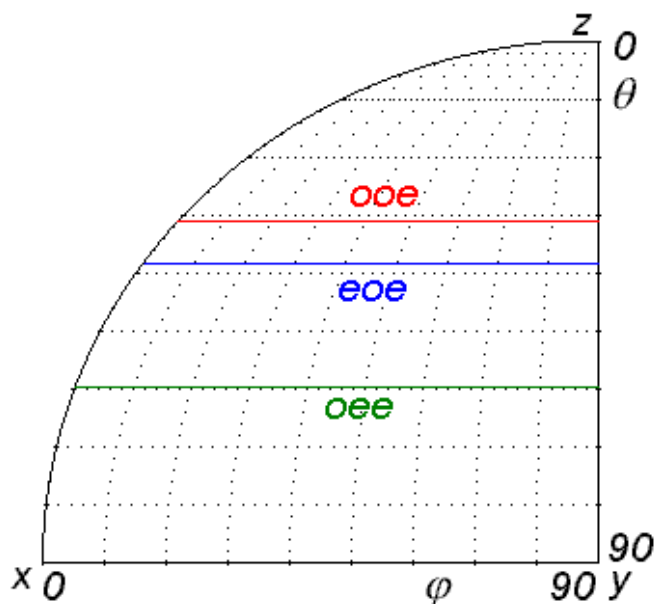
Отрицательный кристалл



ooe – 1-й тип взаимодействия

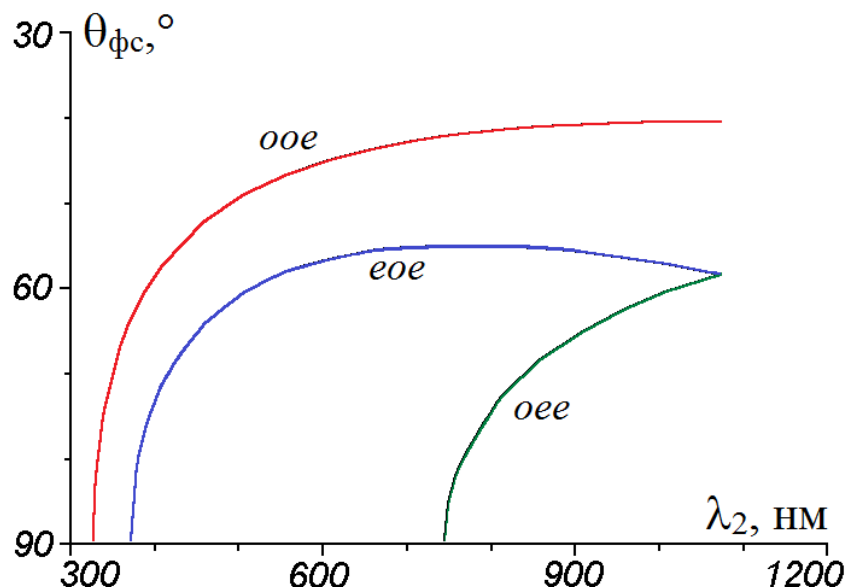
оee, eoe – 2-й тип взаимодействия

Трехчастотное взаимодействие



Направления фазового синхронизма при генерации суммарной частоты в кристалле β -BBO при $\lambda_1=1064,2$ нм и $\lambda_2=532,1$ нм.

Диапазон прозрачности: 0,198 – 2,6 мкм



Дисперсионные зависимости генерации суммарной частоты в кристалле KDP.
 $\lambda_1=1064,2$ нм.

Диапазон прозрачности: 0,176 – 1,5 мкм