

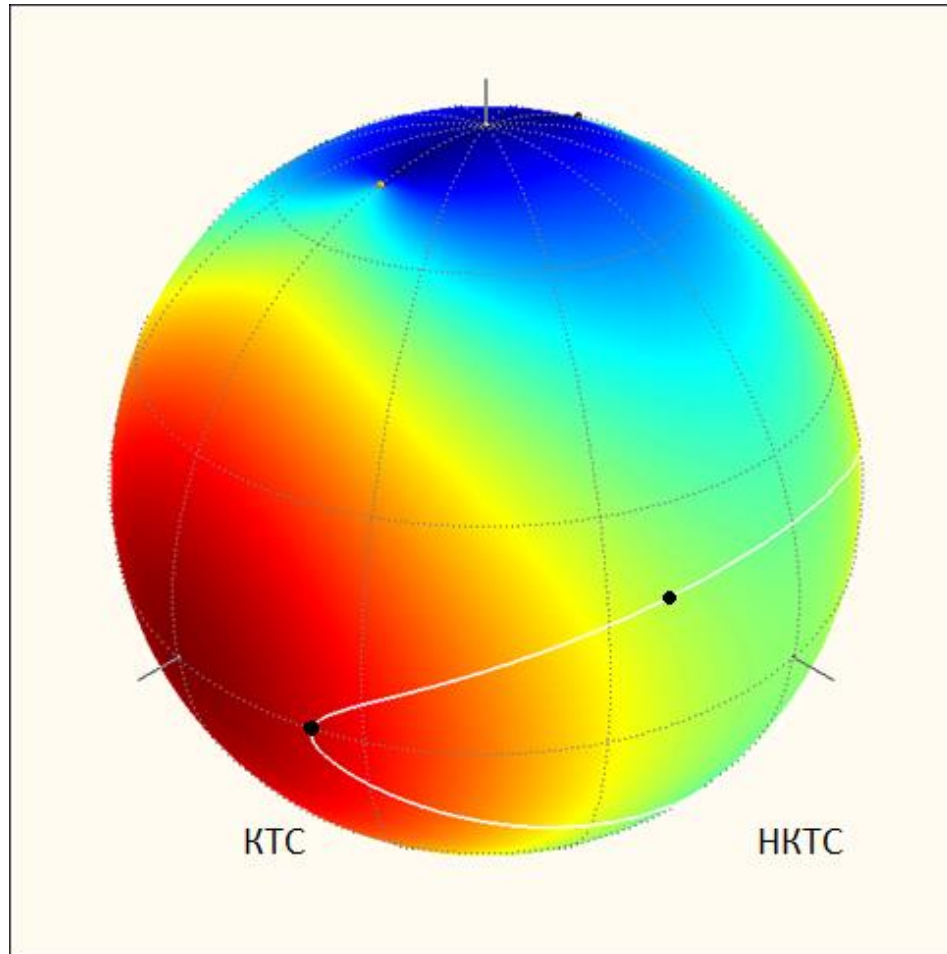
Нечувствительный, критичный и некритичный по температуре синхронизм.

Теория – это когда все известно, но ничего не работает.
Практика – это когда все работает, но никто не знает почему.
Мы же соединяем теорию и практику: ничего не работает ...
И никто не знает почему!

А. Эйнштейн.

Коэффициент эффективной нелинейности

Генерация второй гармоники в кристалле КТР с $\lambda_1 = 1064$ нм, sff тип синхронизма.



КТС: $d_{\text{eff}} = 3,4$ пм/В

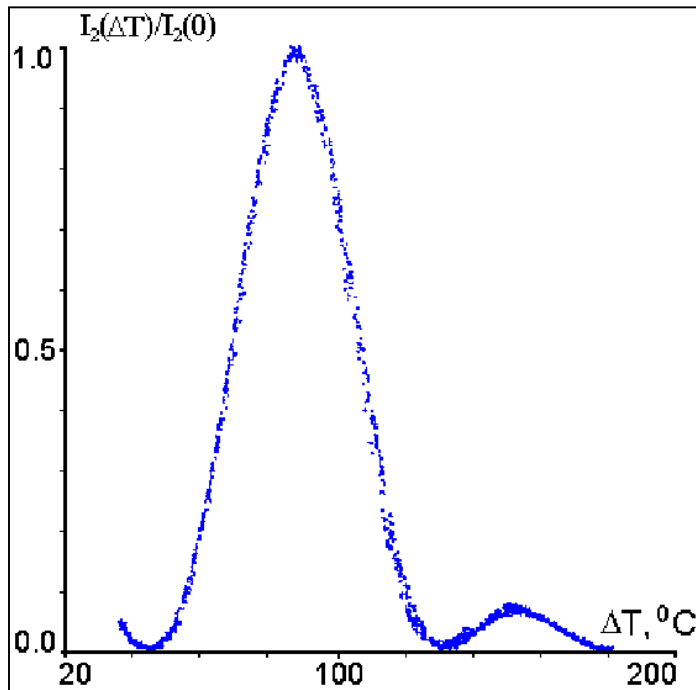
НКТС: $d_{\text{eff}} = 2,1$ пм/В

Температурная ширина синхронизма

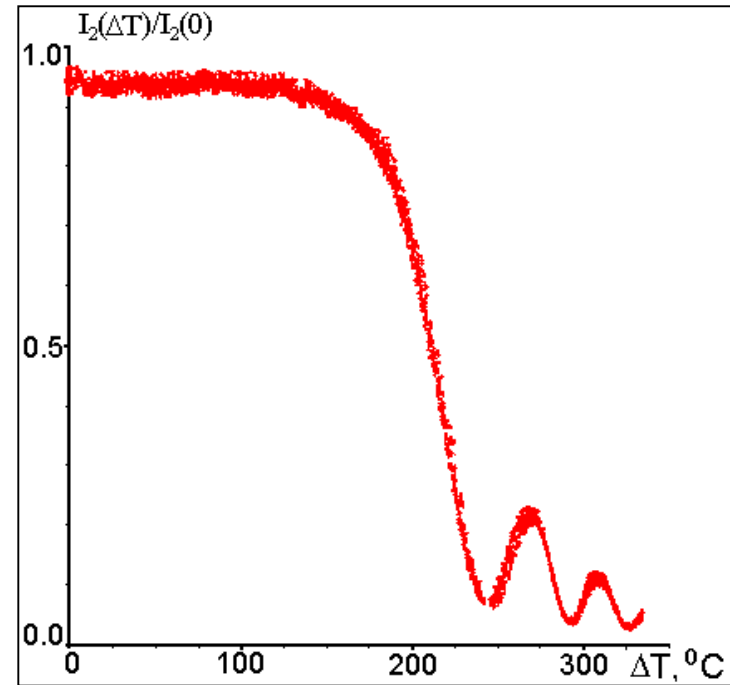
ГВГ $\lambda_1=1,0642$ мкм, **КТР** *sff*

$L=6,3$ мм, $\varphi=23^\circ$, $\theta=90^\circ$

НКТС: $L=7,7$ мм, $\varphi=67^\circ$, $\theta=71^\circ$



$$2\Delta T = 37^\circ\text{C} \quad (23,3^\circ\text{C}\cdot\text{см})$$



$$2\Delta T > 210^\circ\text{C}$$

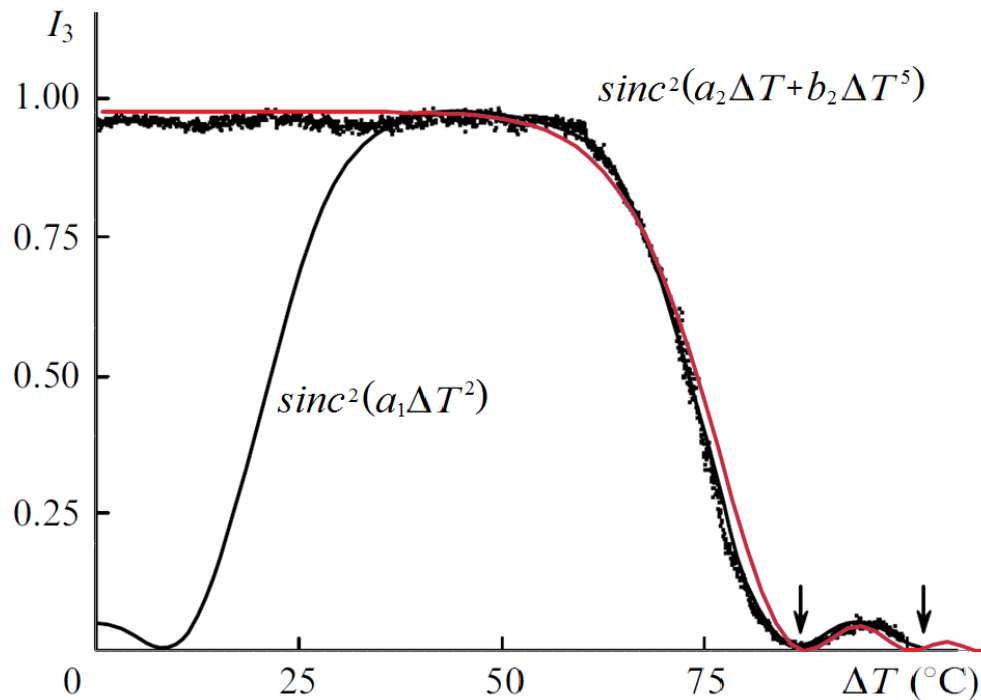
$$\Delta\varphi = \left(\frac{d\Delta k}{dT} \Delta T + \frac{1}{2} \frac{d^2\Delta k}{dT^2} \Delta T^2 + \dots \right) L_{\text{кр}}$$

$$\frac{d^m \Delta k}{dT^m} = 0 !!!$$

Некритичный по температуре синхронизм (НКТС)

ГТГ $\lambda_1=1,0642$ мкм,

LBO *sff* $L=14,1$ мм, $\varphi=39^\circ$, $\theta=75^\circ$



$$\zeta = \text{sinc}^2(\pi \cdot x^2)$$

$$\zeta = \text{sinc}^2\left(\frac{1}{2!} \frac{d^2 \Delta k}{dT^2} T^2\right)$$

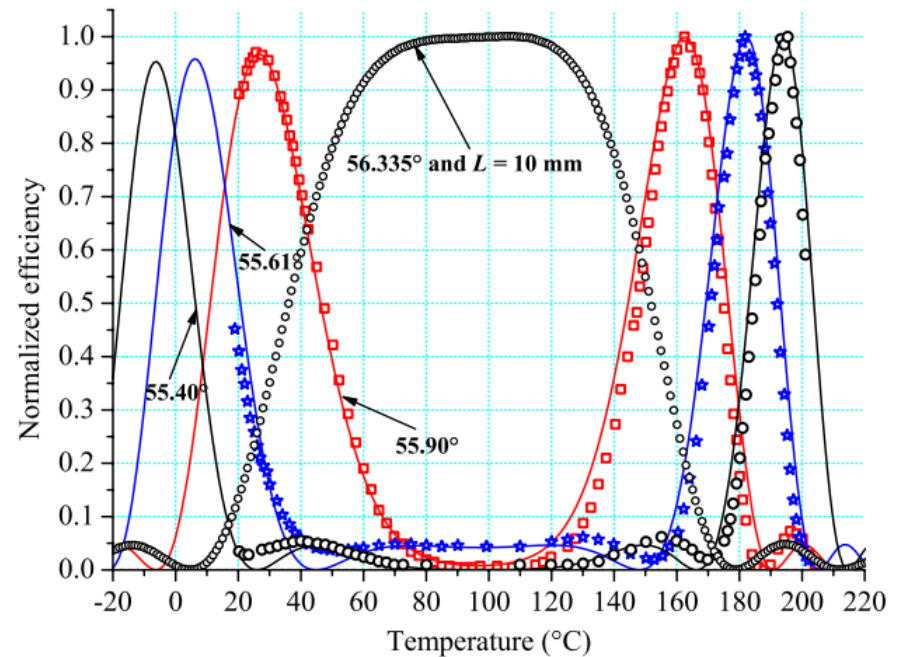
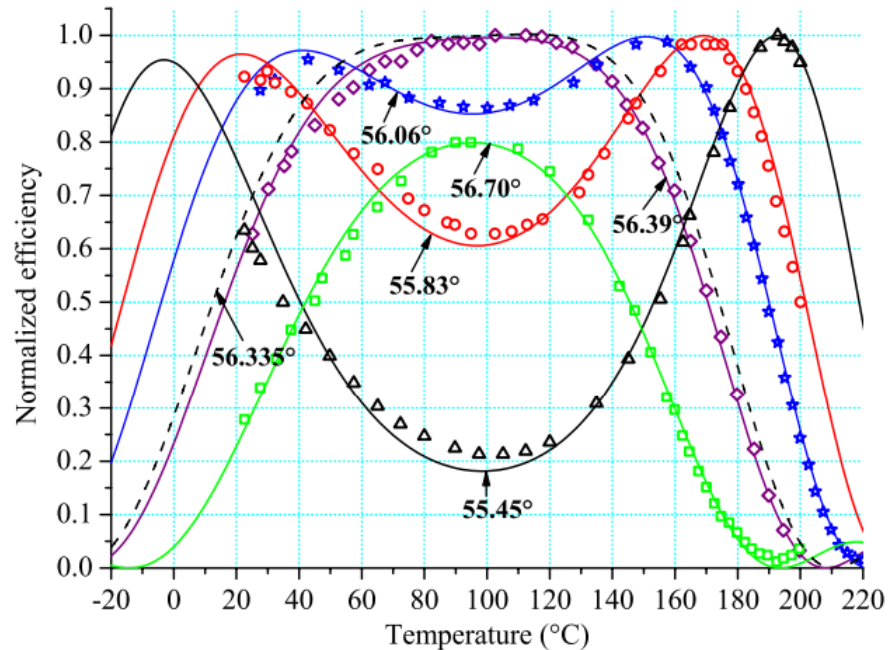
$$\zeta = \text{sinc}^2[\pi \cdot (0,01x^2 - x^5)]$$

$$\zeta = \text{sinc}^2\left(\frac{1}{2!} \frac{d^2 \Delta k}{dT^2} T^2 + \frac{1}{5!} \frac{d^5 \Delta k}{dT^5} T^5\right)$$

$$2\Delta T_{\text{изм}} = \mathbf{73^\circ \text{C}}$$

Получен НКТС 5-го порядка

Некритичный по температуре синхронизм (НКТС)

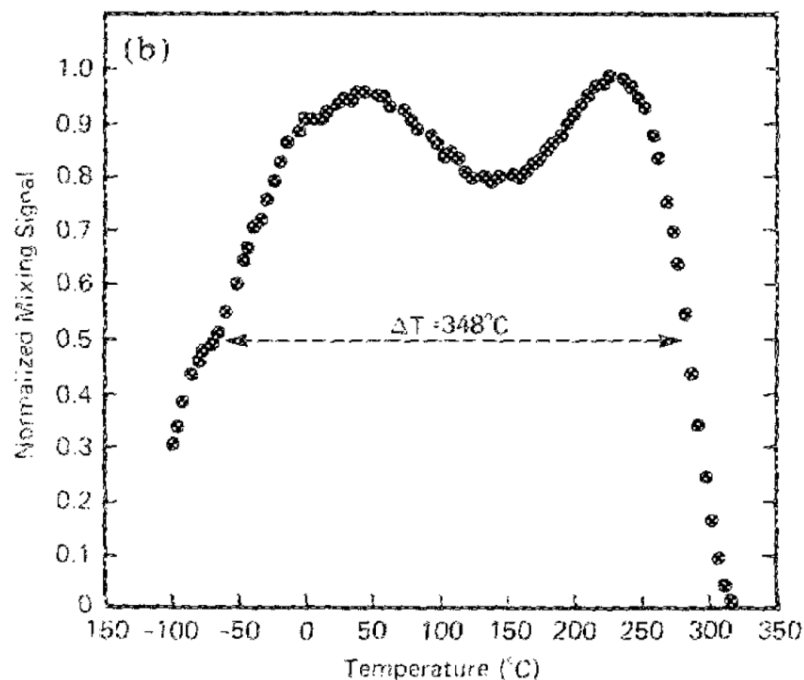


J. Mangin, G. Mennerat, Ph. Villeval. Thermal expansion, normalized thermo-optic coefficients, and condition for second harmonic generation of a Nd:YAG laser with wide temperature bandwidth in **RbTiOPO₄**. JOSA B, 2011, v.28, N4, p.873–881.

Температурные ширины синхронизма

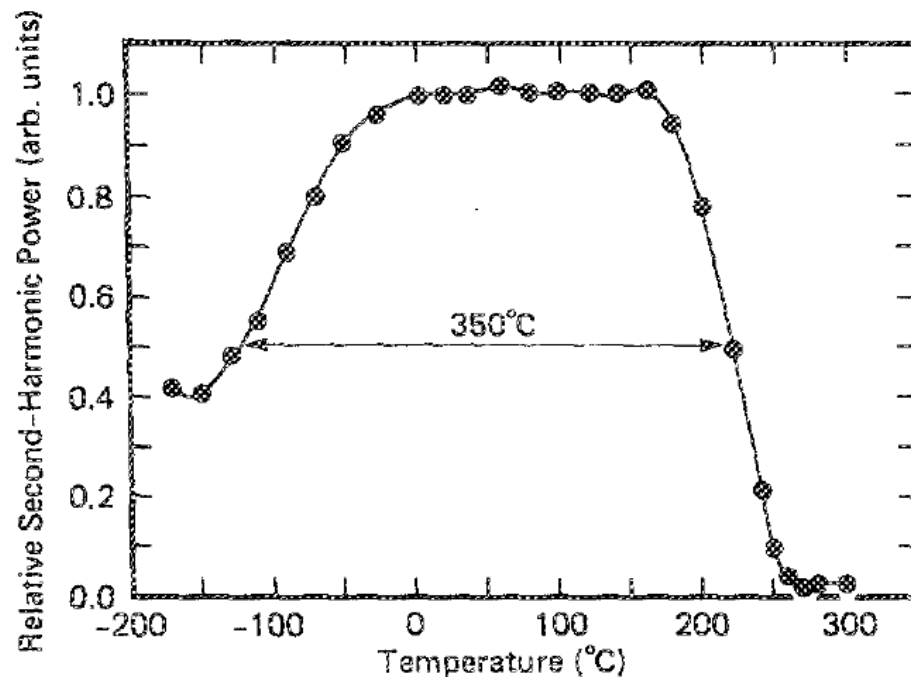
		$\varphi, ^\circ$	$\theta, ^\circ$	$\lambda_1, \text{мкм}$	$\lambda_2, \text{мкм}$	$\lambda_3, \text{мкм}$	$T, ^\circ\text{C}$	$\Delta T, ^\circ\text{C}$
KTP	fsf	90	90	0,9943	0,9943	0,497	20	175
	fsf	90	90	1,064	0,809	0,4596	20	122
	fsf	90	69	1,064	1,064	0,532		100
CLBO	ooe		29,5	1,0642	1,0642	0,5321		52,7
	ooe		27,7	1,3382	1,3382	0,6691		68,7
	oeo		42,4	1,0642	1,0642	0,5321		49,4
KNbO₃	fsf	0	71,4	3,5303	3,5303	1,76515		10,1 ?
KABO	ooe		27,3	1,0642	1,0642	0,5321		41,9
AgGaS₂	ooe		68,5	10,591	10,591	5,2955		139
	ooe		64,3	10,2466	10,2466	5,1233		135
	ooe		57,4	9,5525	9,5525	4,77625		123
	ooe		55,0	9,2714	9,2714	4,6357		118
GaSe	ooe			10,591	10,591	5,2955		172
				5,2955	5,2955	2,6478		218 ⁶

НКТС – экспериментальные данные



ГСЧ: **КТР** $\lambda_1=1,0642$ мкм $\lambda_2=0,809$ мкм

$L=3,5$ мм, $2\Delta T_{\text{изм}} = \mathbf{348^{\circ}\text{C}}$, $2\Delta T_{\text{фс}} = \mathbf{122^{\circ}\text{C}}$



ГВГ: **КТР** $\lambda=0,9943$ мкм

$L=5$ мм, $2\Delta T_{\text{изм}} = \mathbf{350^{\circ}\text{C}}$, $2\Delta T_{\text{фс}} = \mathbf{175^{\circ}\text{C}}$

Temperature insensitive !!!

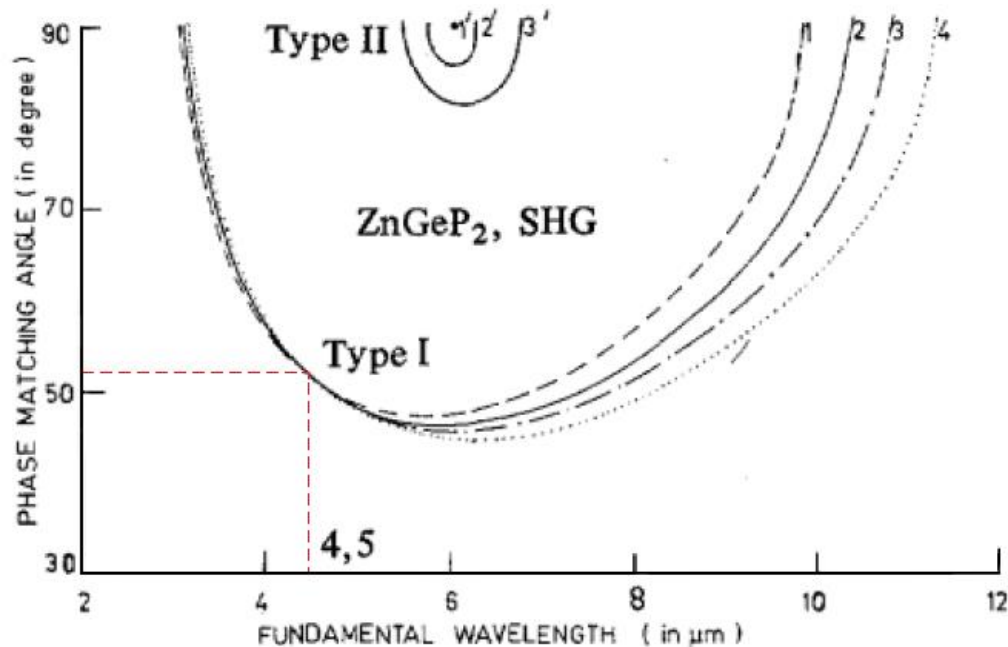
J.S. Baumert, F.M. Schellenberg, W. Lenth, W.P. Risk, G. Bjorklund. Appl.Phys.Lett, 1987, v.51, N26, p.2192-2194.

W.P. Risk, R. N. Payne, W. Lenth, C. Harder, H. Meier. Appl.Phys.Lett, 1989, v.55, N12, p.1179-1181.

Некритичный по температуре синхронизм

Положительный одноосный кристалл ZnGeP_2

$$\frac{d\theta}{dT} = 0 ?$$



Type I: 1 is -180°C , 2 is 20°C , 3 is 200°C , 4 is 400°C

Type II: 1' is 275°C , 2' is 300°C , 3' is 400°C .

$\lambda = 4.5 \mu\text{m}$

$2\Delta T_{\text{изм}} = 580^\circ\text{C}$,

Temperature noncritical ???

ФС и не критичные по температуре взаимодействия

ФС:

$$\Delta k = k_3 - k_2 - k_1 = 2\pi \left[\frac{n_3(\lambda_3, \varphi, \theta)}{\lambda_3} - \frac{n_2(\lambda_2, \varphi, \theta)}{\lambda_2} - \frac{n_1(\lambda_1, \varphi, \theta)}{\lambda_1} \right] = 0$$

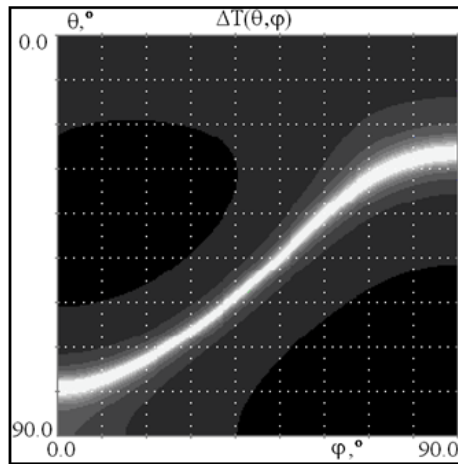
НКТВ:

$$\frac{d\Delta k}{dT} = 2\pi \left[\frac{1}{\lambda_3} \frac{dn_3(\lambda_3, \varphi, \theta)}{dT} - \frac{1}{\lambda_2} \frac{dn_2(\lambda_2, \varphi, \theta)}{dT} - \frac{1}{\lambda_1} \frac{dn_1(\lambda_1, \varphi, \theta)}{dT} \right] = 0$$

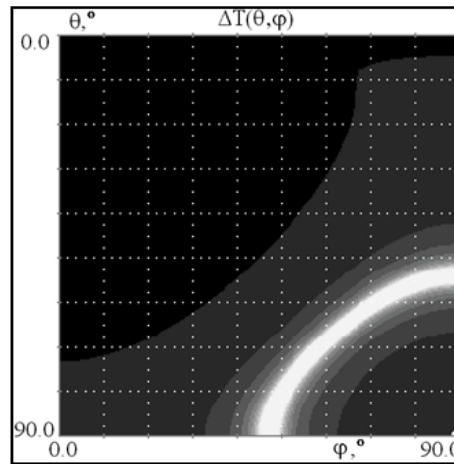
(Некритичный по температуре синхронизм) = (ФС) + (НКТВ)

ФС и некритичные по температуре взаимодействия

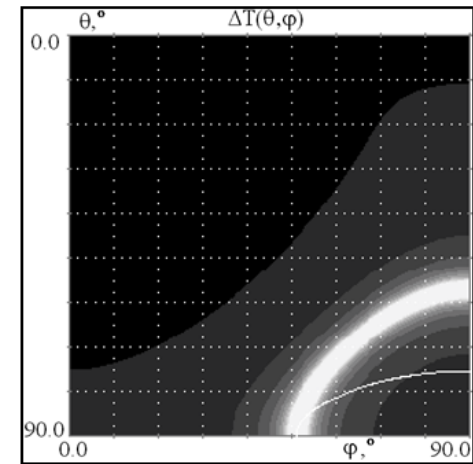
Crystal - KTP



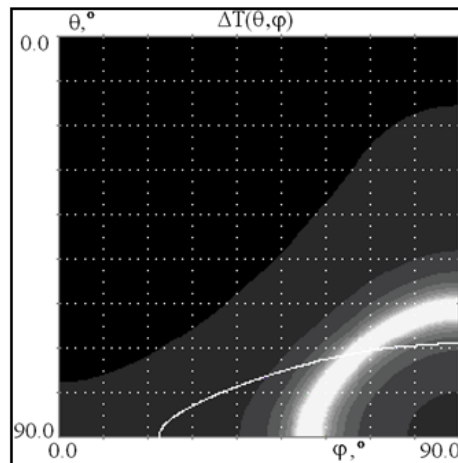
700 nm



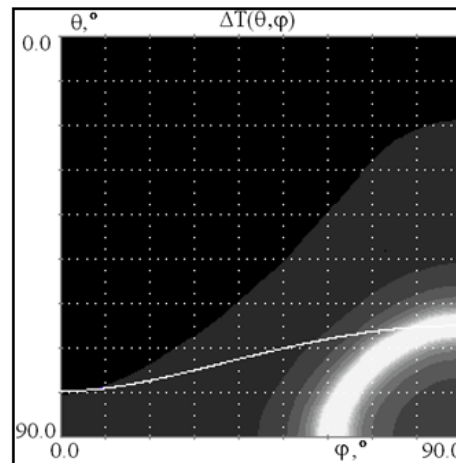
994 nm



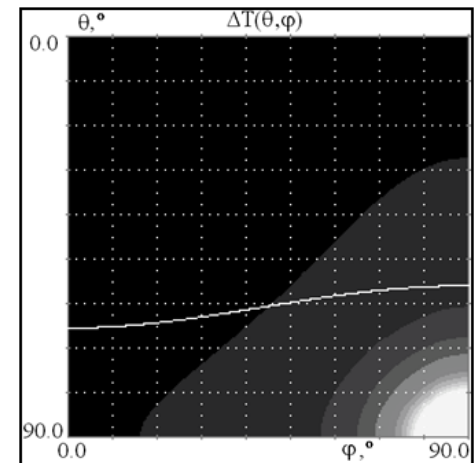
1026,5 nm ($\varphi_c = 51^\circ$)



1064 nm ($\varphi_c = 67^\circ$, $\theta_c = 71^\circ$)



1096,7 nm ($\theta_c = 65^\circ$)



1205 nm ($\theta_c = 90^\circ$)

KTP (sff): *TNCI* - 700 ... 1205 nm,
TNCPhM - 1026,5 ... 1096,7 nm.

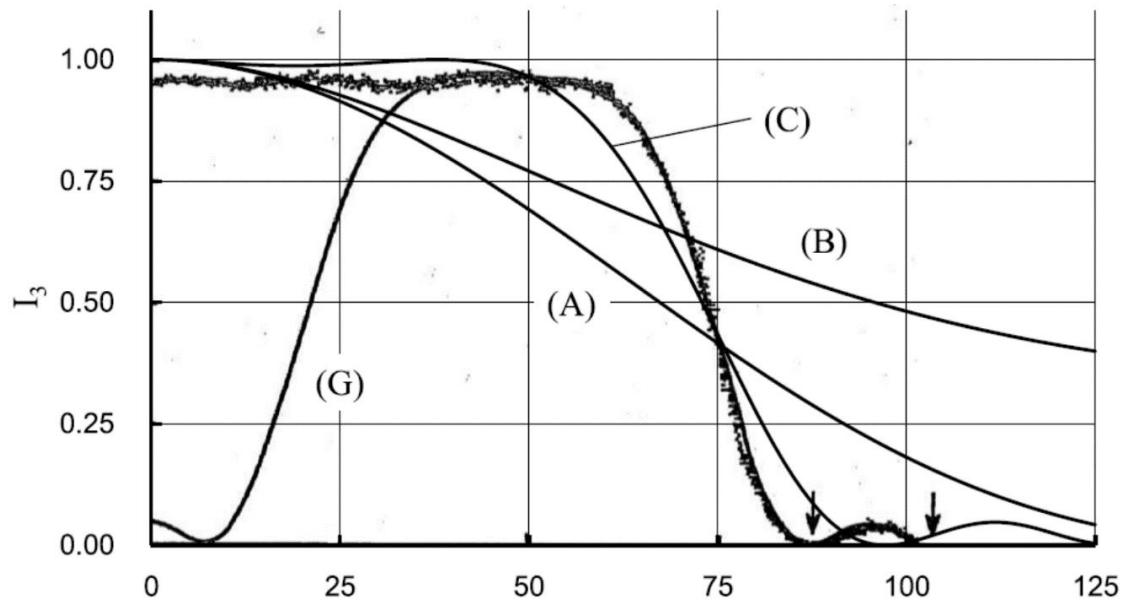
Термооптические параметры кристалла LBO

$$dn_x/dT = (-0.3760 \lambda + 0.2300) \times 10^{-5}, (\text{°C}^{-1}),$$

$$dn_y/dT = (0.5779 \lambda - 1.9318) \times 10^{-5}, (\text{°C}^{-1}),$$

$$dn_z/dT = (0.4073 \lambda - 1.1569) \times 10^{-5}, (\text{°C}^{-1}).$$

$$(0.266 \mu\text{m} < \lambda < 1.908 \mu\text{m})$$



The solid line (C) is the theoretical curve calculated with equation (2) by using $d(\Delta n)/dT = -4.9700 \times 10^{-7} \text{ °C}^{-1}$ and $\underline{d^2(\Delta n)/dT^2} = 2.6196 \times 10^{-8} \text{ °C}^{-2}$.

Размерность температурной ширины синхронизма

$$\Delta\varphi = \left(\frac{d\Delta k}{dT} \Delta T + \frac{1}{2} \frac{d^2\Delta k}{dT^2} \Delta T^2 + \dots \right) L_{\text{кр}}$$

Критичный по температуре синхронизм

$$\Delta T_{\text{фс}} = 0,886 \pi / (d\Delta k / dT) / L_{\text{кр}} \text{ [}^\circ\text{C}\cdot\text{см]}$$

Некритичный по температуре синхронизм 2-го порядка

$$\Delta T_{\text{фс}} = \sqrt{1,772 \pi / (d^2\Delta k / dT^2) / L_{\text{кр}}} \text{ [}^\circ\text{C}\cdot\text{см}^{1/2}\text{]}$$

Некритичный по температуре синхронизм m -го порядка

$$\Delta T_{\text{фс}} = [1,772 \pi / (dm\Delta k / dT^m)]^{1/m} / (L_{\text{кр}})^{1/m} \text{ [}^\circ\text{C}\cdot\text{см}^{1/m}\text{]}$$

Нечувствительный по температуре синхронизм

Temperature-insensitive ↔ Temperature noncritical

$$2\Delta T_{\text{кр}} = 0,886 \pi / L_{\text{кр}} / (d\Delta k / dT) \quad [^{\circ}\text{C}]$$

Измерение с $L_{\text{кр}}$

$$2\Delta T_{\text{фс}} = 0,886 \pi / (d\Delta k / dT) \quad [^{\circ}\text{C} \cdot \text{см}]$$

Параметр кристалла с $L_{\text{кр}} = 1 \text{ см}$

Обработка экспериментальных данных:

Критичный по температуре синхронизм

$$2\Delta T_{\text{фс}} = 2\Delta T_{\text{кр}} \cdot L_{\text{кр}} \quad [^{\circ}\text{C} \cdot \text{см}]$$

~~Некритичный по температуре синхронизм второго порядка~~

$$\Delta T_{\text{фс}} = \Delta T_{\text{кр}} \cdot (L_{\text{кр}})^{1/2} \quad [^{\circ}\text{C} \cdot \text{см}^{1/2}]$$

Не используют на практике для НКЧС

Нечувствительный по температуре синхронизм

$$2\Delta T_{\text{фс}} = 2\Delta T_{\text{кр}} \cdot L_{\text{кр}} \quad [^{\circ}\text{C} \cdot \text{см}]$$

Используют на практике для НКЧС

**Во всех публикациях измерения при НКТС -
величина температурной ширины синхронизма определена с ошибкой.**

Некритичный по температуре синхронизм

Общий случай

Некритичный по температуре синхронизм m -го порядка ($m=1, 2, 3, \dots$)

$$0,443 \pi = \left(\frac{d\Delta k}{dT} \Delta T + \frac{1}{2} \frac{d^2\Delta k}{dT^2} \Delta T^2 + \dots + \frac{1}{m!} \frac{d^m\Delta k}{dT^m} \Delta T^m \right) L_{\text{кр}}$$

$2\Delta T_{\text{фс}}$ — корень полинома m -й степени Размерность - [$^{\circ}\text{C} \cdot ?$]

Представление измеренной величины:

Вариант - [$^{\circ}\text{C}/L_{\text{кр}}$] \rightarrow КТР ($\varphi=67^{\circ}$, $\theta=71^{\circ}$): $2\Delta T = [>210^{\circ}\text{C}/7,1 \text{ мм}]$

“However, the temperature insensitive phase matching so far can be realized only occasionally in a specific wavelength”.

(Однако нечувствительный к температуре фазовый синхронизм до сих пор может быть реализован только изредка на определенной длине волны).

H.Z. Zhong, P. Yuan, H.Y. Zhu, L.J. Qian. Versatile temperature-**insensitive** second-harmonic generation by compensating thermally induced phase-mismatch in a two-crystal design. Laser Phys. Lett., 2012, v.9, N6, p.434–439.

Термо-деформационные изменения кристаллов

Коэффициенты теплового расширения кристаллов.

$$\Delta\varphi = \left(\Delta k_0 + \frac{d\Delta k}{dT} \Delta T \right) L(1 + \beta\Delta T)$$

$$\beta\Delta T \ll 1$$

Изотропные среды:

$$\beta = \frac{1}{L} \frac{dL}{dT}$$

Анизотропные среды – главные значения:

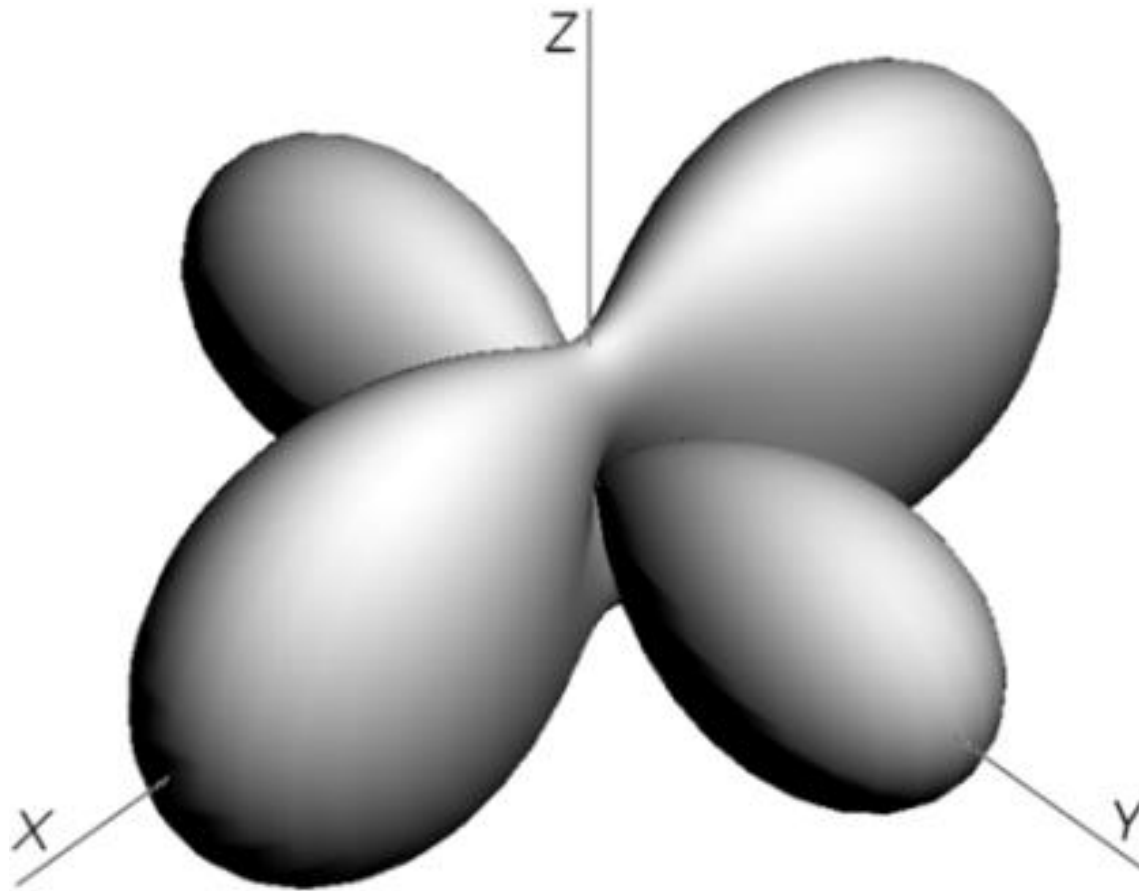
$$\beta_i = \frac{1}{L_i} \frac{dL_i}{dT}$$

$$\beta_{ii} = \begin{vmatrix} \beta_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \beta_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \beta_{33} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \beta_1 & 0 & 0 \\ 0 & \beta_2 & 0 \\ 0 & 0 & \beta_3 \end{vmatrix}$$

Коэффициенты теплового расширения кристаллов.

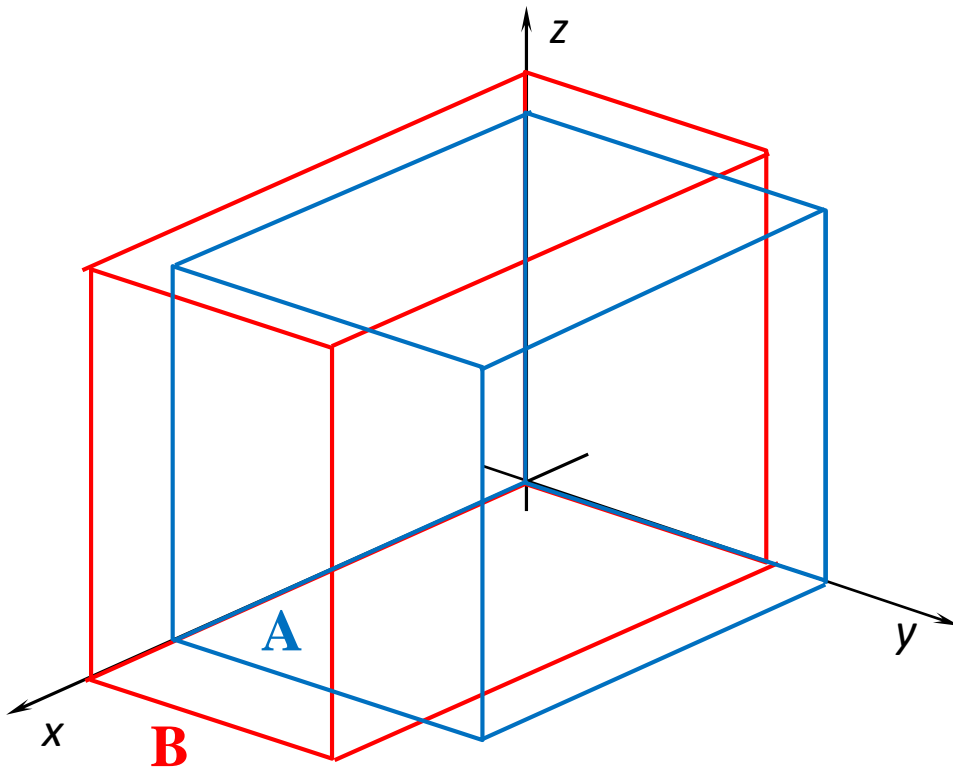
Кристалл		$\alpha_x, 10^{-6}, ^\circ\text{C}^{-1}$	$\alpha_y, 10^{-6}, ^\circ\text{C}^{-1}$	$\alpha_z, 10^{-6}, ^\circ\text{C}^{-1}$
KDP	ОО	25,6	25,6	41,6
ADP	ДО	1,9	1,9	39,3
LiNbO ₃	ОО	16,7	16,7	2,0
BBO	ОО	4,0	4,0	36,0
AgGaS ₂	ОО	12,7	12,7	-13,2
AgGaSe ₂	ОО	19,8	19,8	-8,1
ZnGeP ₂	ОО	17,5	17,5	15,9
LB ₃ O ₅	ДО	107,1	-95,4	33,7
Li ₂ B ₄ O ₇	ОО	16,0	16,0	-4,0
CsB ₃ O ₅	ДО	20,0	11,0	42,0
CLBO	ОО	20,0	20,0	-22,0
BiBO	ДО	-28,0	54,0	8,0
KTP	ДО	11,0	9,00	0,6
KTA	ДО	8,03	12,2	0,02

Характеристическая поверхность коэффициентов линейного расширения кристалла LBO.



Расширение кристалла вдоль главных осей.

$$L_i(T) = L_{i,0}(1 + \beta_i \Delta T) = L_{i,0} (1 + \varepsilon_i)$$



$$\beta_{ii} = \begin{vmatrix} \beta_1 & 0 & 0 \\ 0 & \beta_2 & 0 \\ 0 & 0 & \beta_3 \end{vmatrix}$$

$$\varepsilon_x = \beta_x \cdot \Delta T$$

$$\varepsilon_y = \beta_y \cdot \Delta T$$

$$\varepsilon_z = \beta_z \cdot \Delta T$$

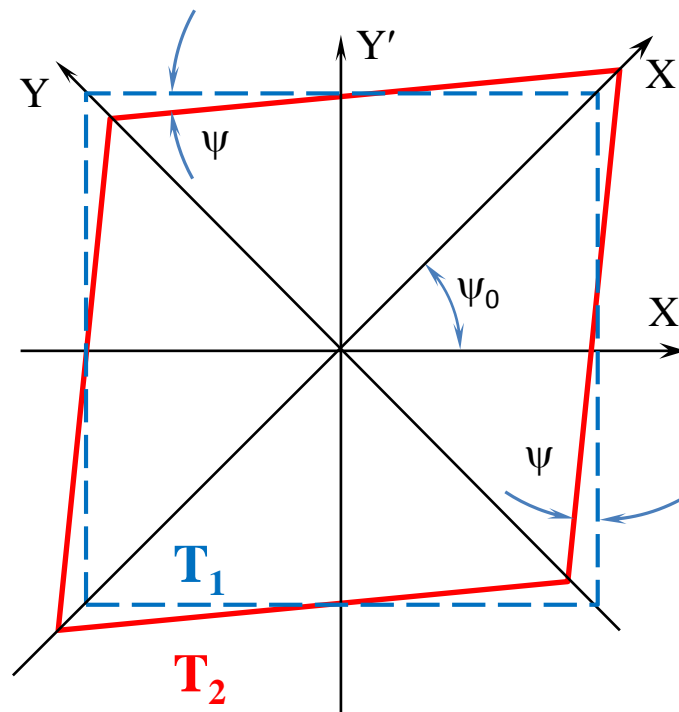
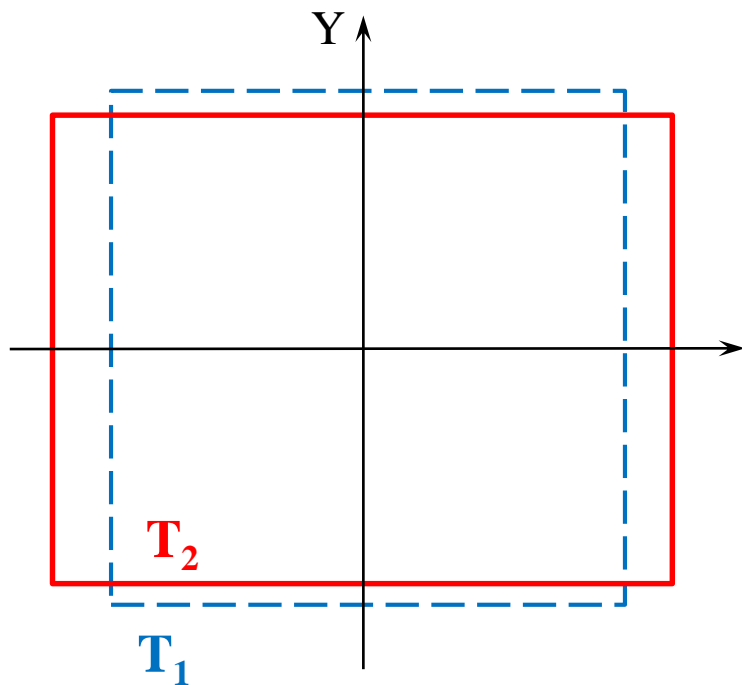
A: $T = T_1$

B: $T = T_2 > T_1$

Термо-деформационные изменения кристалла.

Кристалл LBO.

$$\beta_x, \beta_z > 0, \quad \beta_y < 0$$

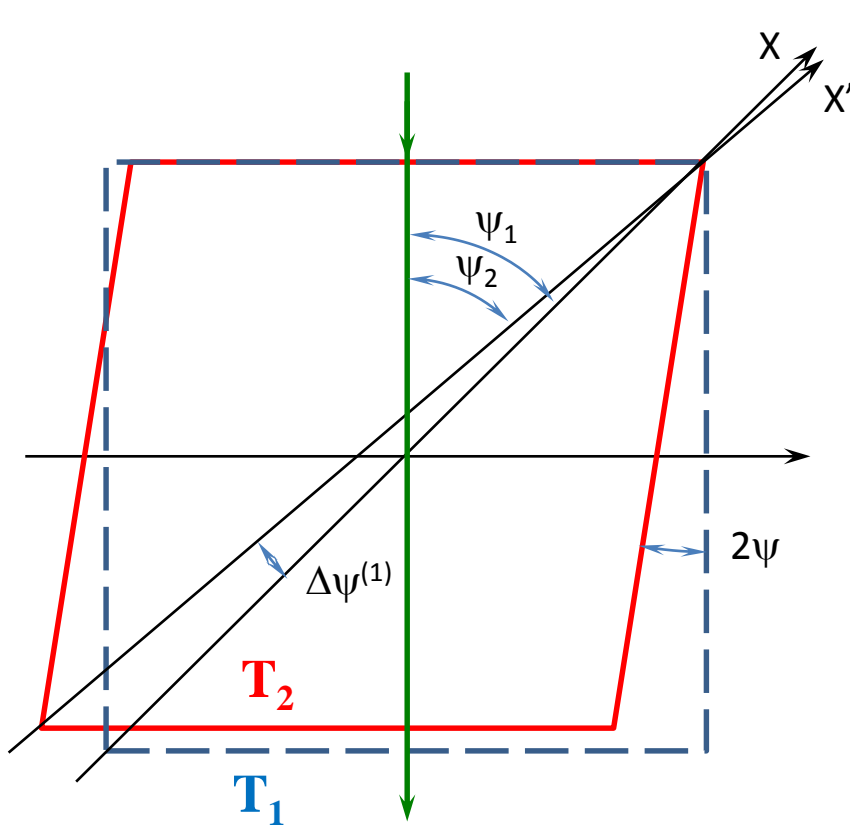


$$T_2 > T_1$$

$$X \perp Y \text{ и } X' \perp Y'$$

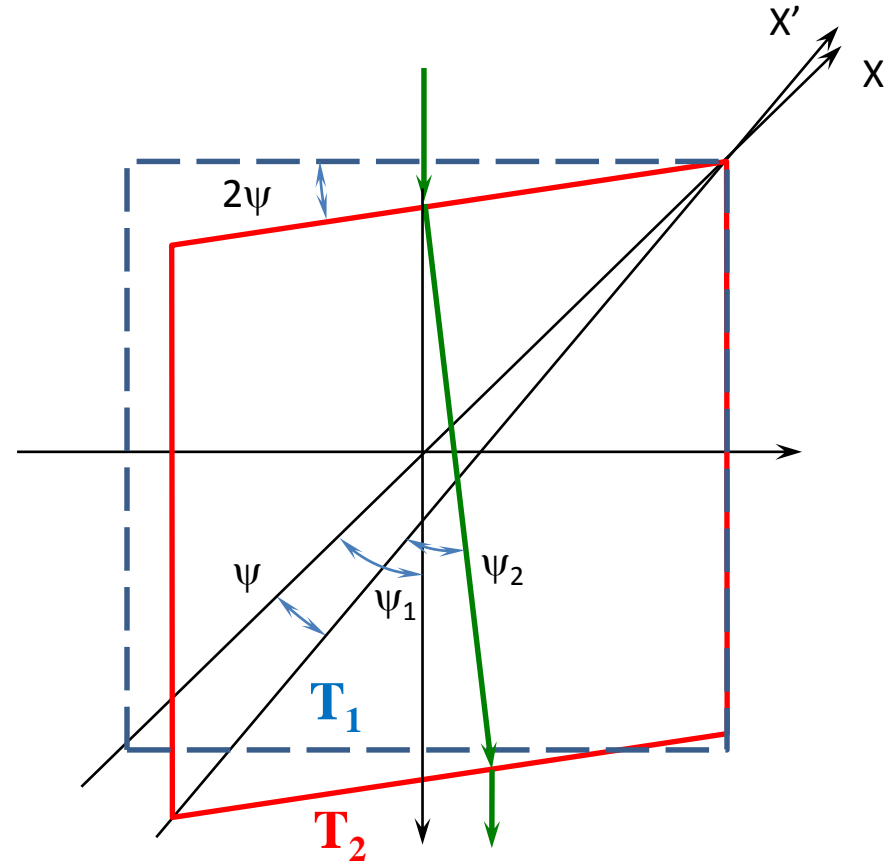
Плоскость xu : $\psi = 0,5 \cdot (\beta_x - \beta_y) \cdot \sin 2\psi \cdot T$

Преобразователь частоты с фиксацией.



Фиксация входной грани

$$\Delta\psi^{(1)} = \psi_2 - \psi_1 = \psi$$



Фиксация боковой грани

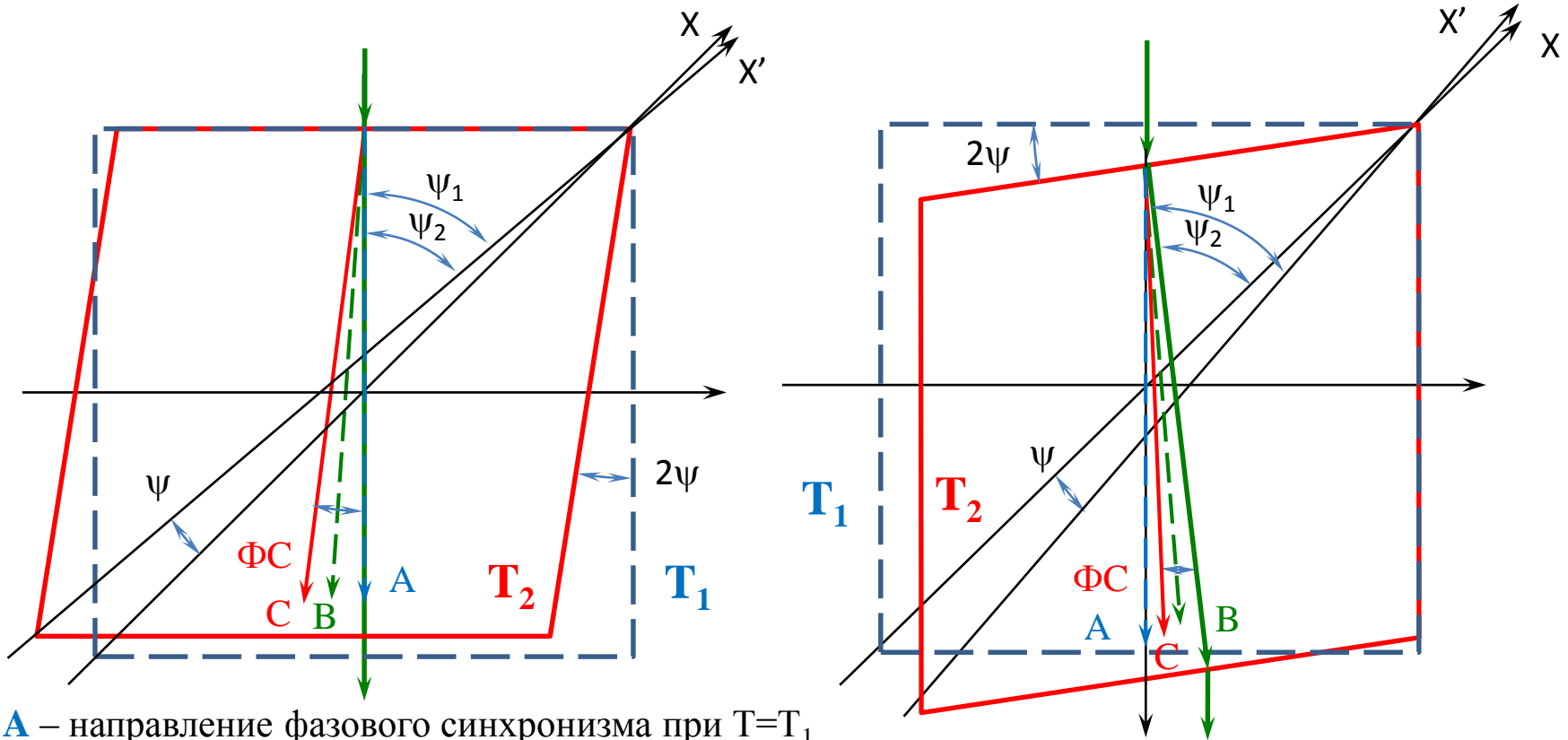
$$\Delta\psi^{(2)} = \psi_2 - \psi_1 = -\psi(1 - 2/ni)$$

Кристалл: *LBO*.

$$d\Delta\psi^{(1)}/dT = +0.3316 \text{ угл.мин/}^\circ\text{C}$$

$$d\Delta\psi^{(2)}/dT = -0.0796 \text{ угл.мин/}^\circ\text{C}$$

Температурные изменения направления фазового синхронизма



A – направление фазового синхронизма при $T=T_1$

B – направление фазового синхронизма при $T=T_2$ только с термо-деформацией

C – направление фазового синхронизма при $T=T_2$ с термо-деформацией и dn_i/dT ($T_2 > T_1$)

Температурные изменения направления фазового синхронизма:

1. Температурные изменения показателей преломления $\rightarrow d\psi_{pm}/dT$
2. Термо-деформационные изменения $\rightarrow d\Delta\psi_j/dT = d\psi_2/dT - d\psi_1/dT$

Полное изменение направления фазового синхронизма:

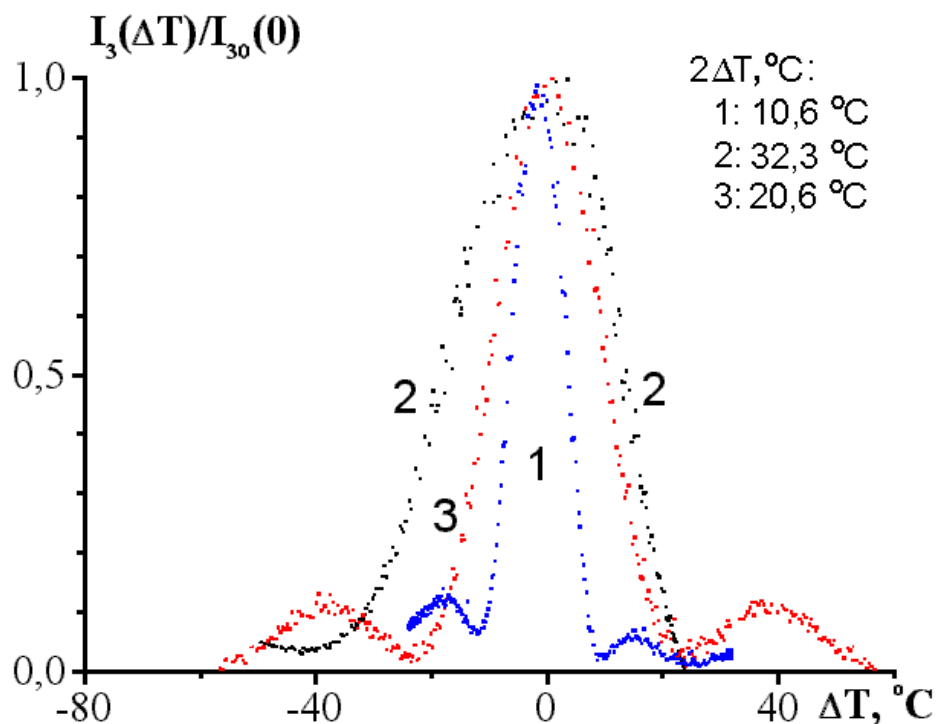
$$d\Delta\psi_{s,j}/dT = d\psi_{pm}/dT - d\Delta\psi_j/dT$$

Генерация третьей гармоники.

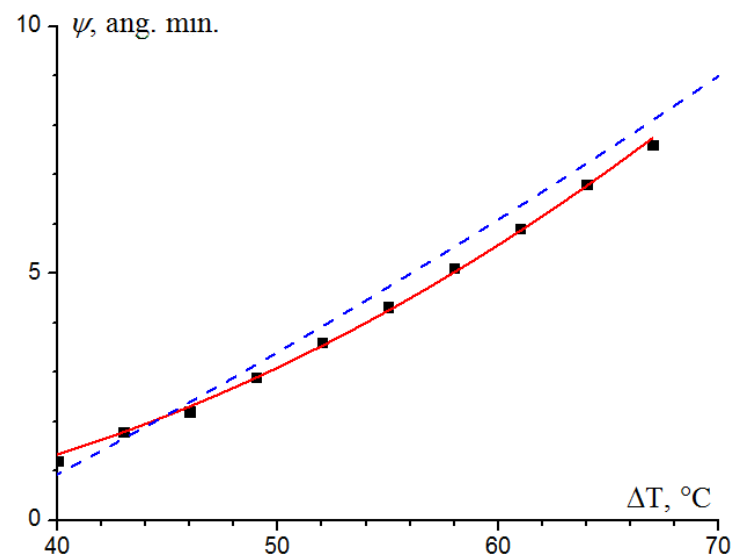
Кристалл: LBO (длина – 5,33 мм)

Тип синхронизма: ssf ($\varphi = 45^\circ$, $\theta = 90^\circ$)

Длины волн: ГТГ (1064 нм)+(532 нм)



1. Прижим – входная.
2. Прижим – боковая.
3. Прижим – сверху.



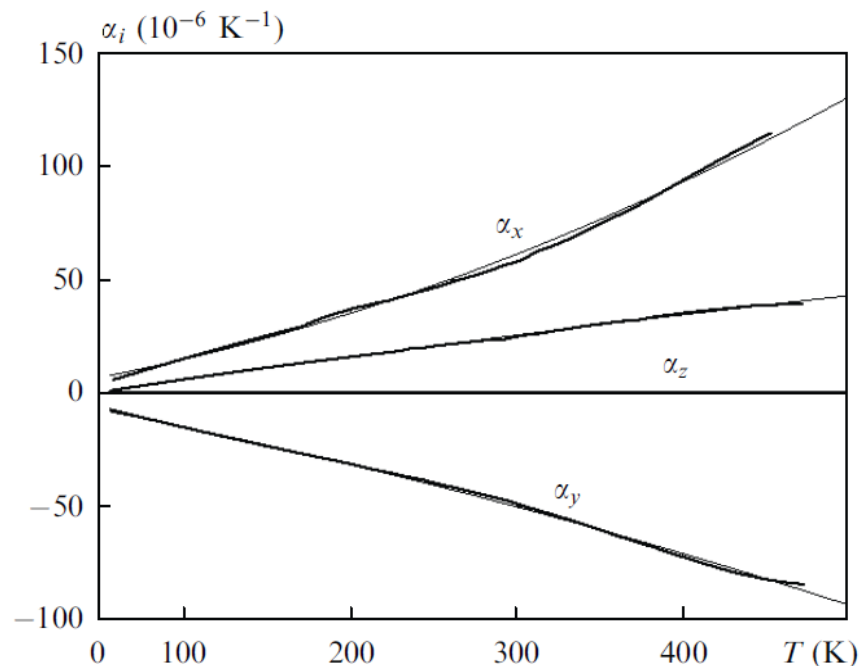
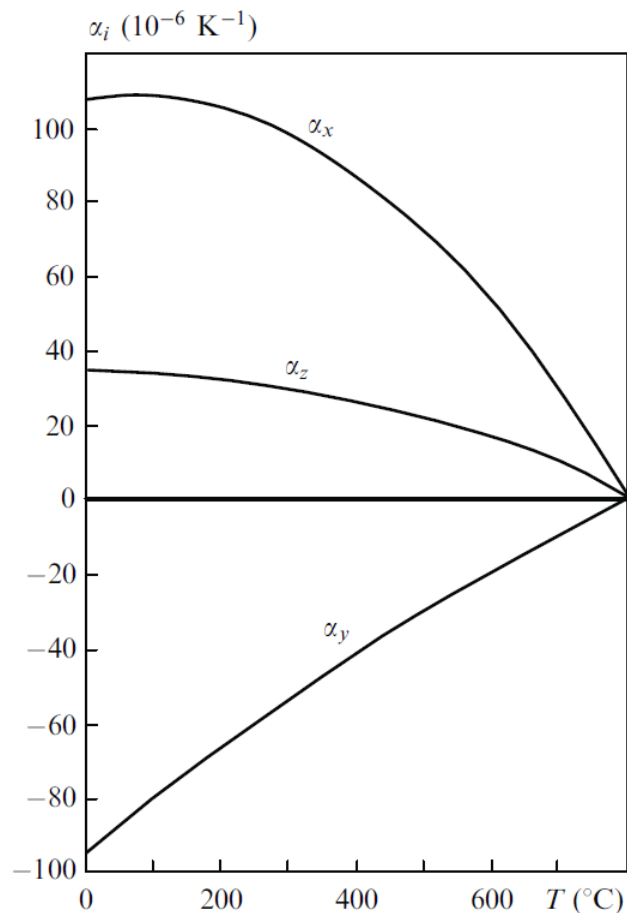
Зависимость угла ψ от температуры кристалла.

Расчет (1 см):

$$1: (2\Delta T)^{(1)} / L_{cr} = 11.16 ^\circ\text{C}$$

$$2: (2\Delta T)^{(2)} / L_{cr} = 34,24 ^\circ\text{C}$$

Коэффициенты линейного расширения кристалла LBO



W. Lin, G. Dui, Q. Huang, A. Zhen, J. Liang. J. Phys. D, 1990, v.23, p.1073.

С.Г. Гречин, А.В. Зуев, А.Е. Кох, Н.В. Моисеев, П.А. Попов, А.А. Сидоров, А.С. Фокин.

Теплофизические параметры кристалла LBO. Квантовая электроника, 2010, т.40, N6, с.509-512.

Некритичное по температуре двулучепреломление (НКТД)

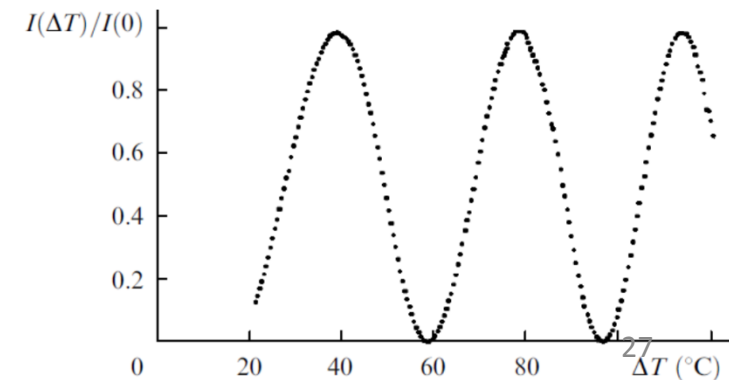
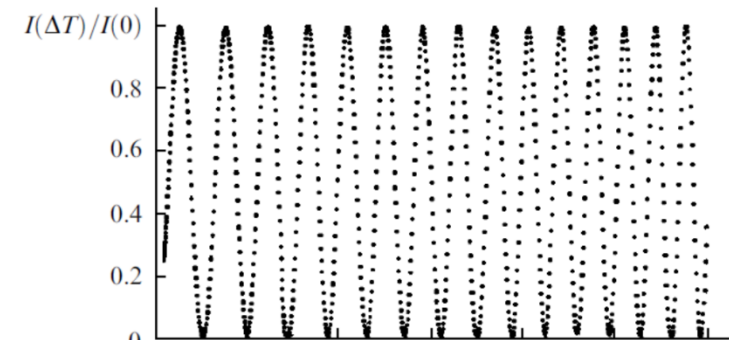
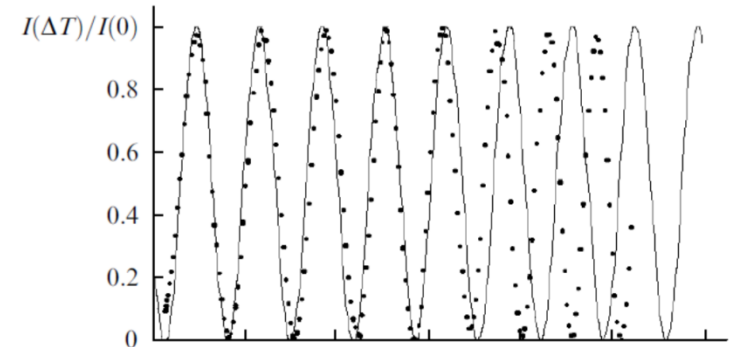
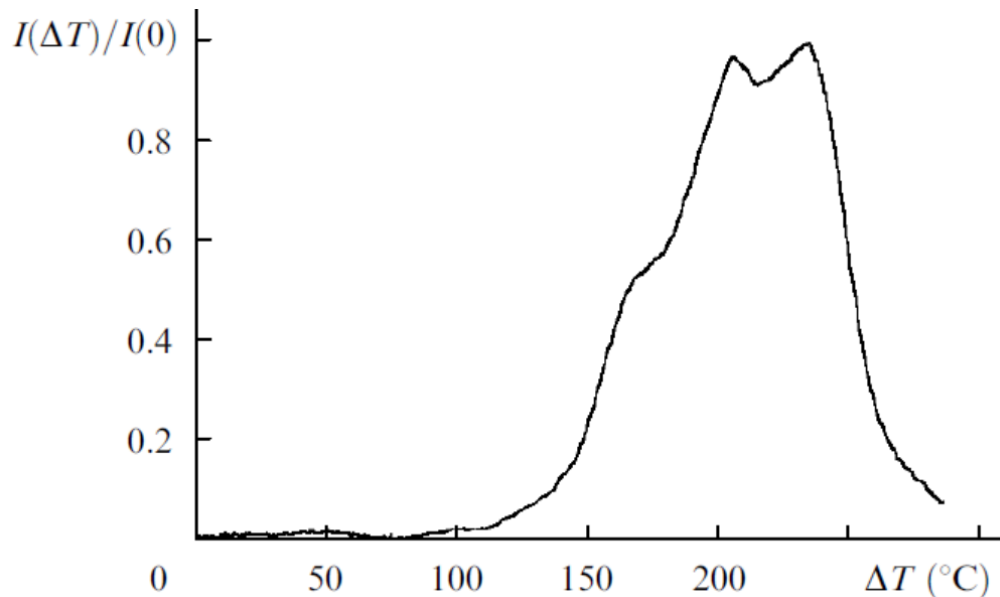
Некритичное по температуре двулучепреломление

$$\Delta\varphi = k_0 L \left[(n_1 - n_2) + \left(\frac{dn_1}{dT} - \frac{dn_2}{dT} \right) \Delta T + \frac{1}{2} \left(\frac{d^2 n_1}{dT^2} - \frac{d^2 n_2}{dT^2} \right) \Delta T^2 + \dots \right]$$

Кристалл **КТР**:

Срез.		L, мм	2ΔT, °C
x: φ=0°,	θ=90°	4,35	7,1 °C
y: φ=90°,	θ=90°	5,37	9,6 °C
z: φ=0°,	θ=0°	4,75	21,4 °C
xz : φ=0°,	θ=39,3°	5,9	166 °C .

$\lambda=632,8$ нм



Некритичное по температуре двулучепреломление

Кристалл: **LBO**

Срез	L , мм	$2\Delta T$
x $\varphi=0^\circ, \theta=0^\circ$	5,35	6,0 °C
<u>xz</u> $\varphi=90^\circ, \theta=53^\circ$	5,37	62,0 °C

$\lambda=632,8$ нм

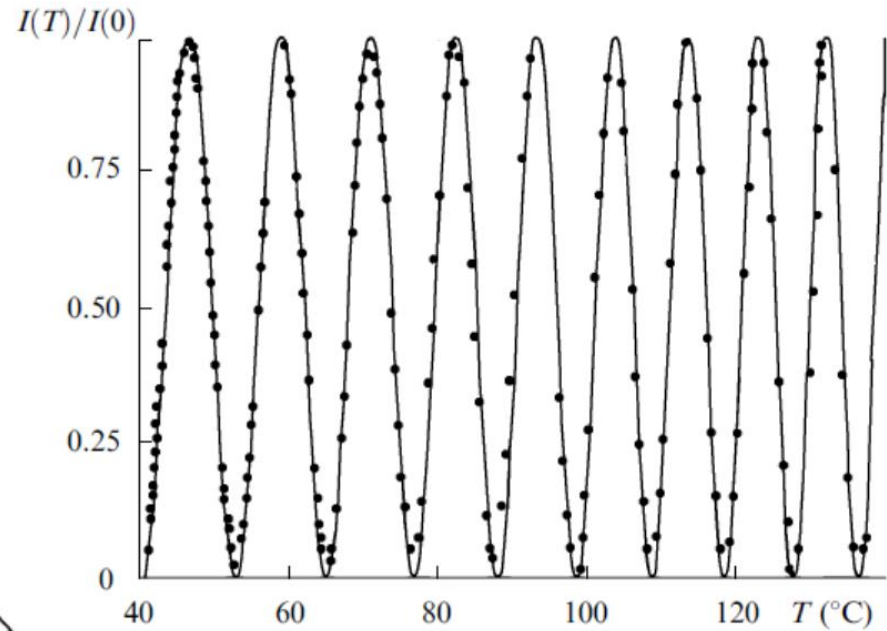
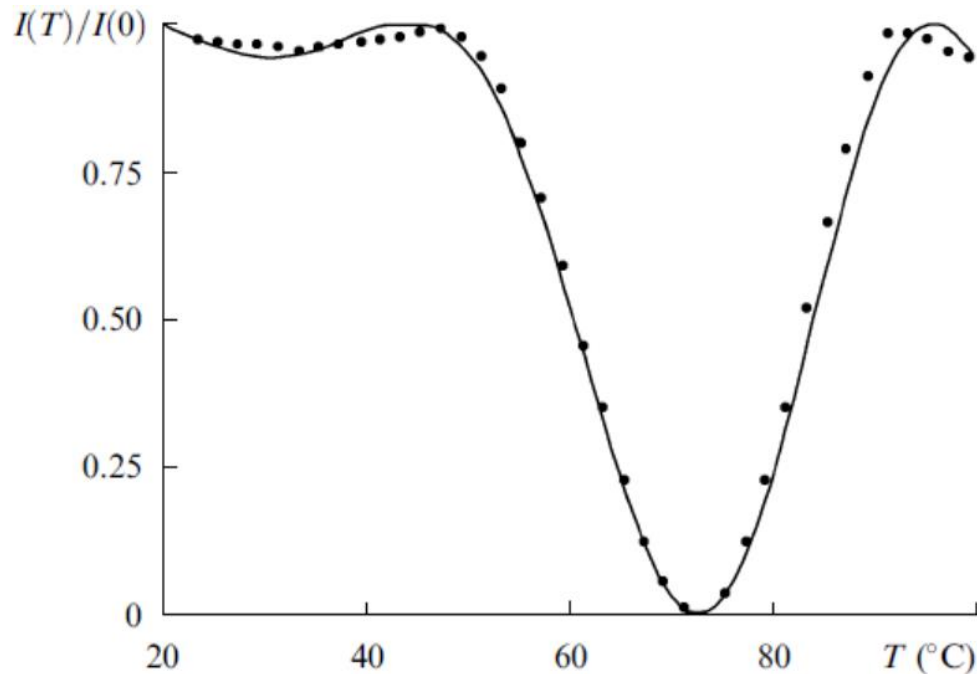
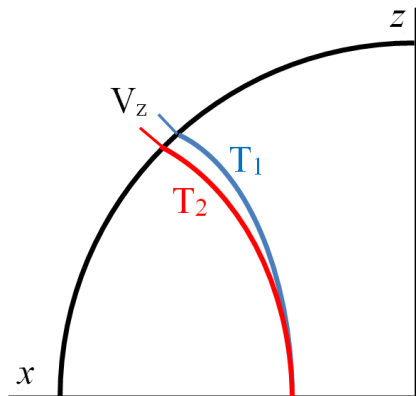
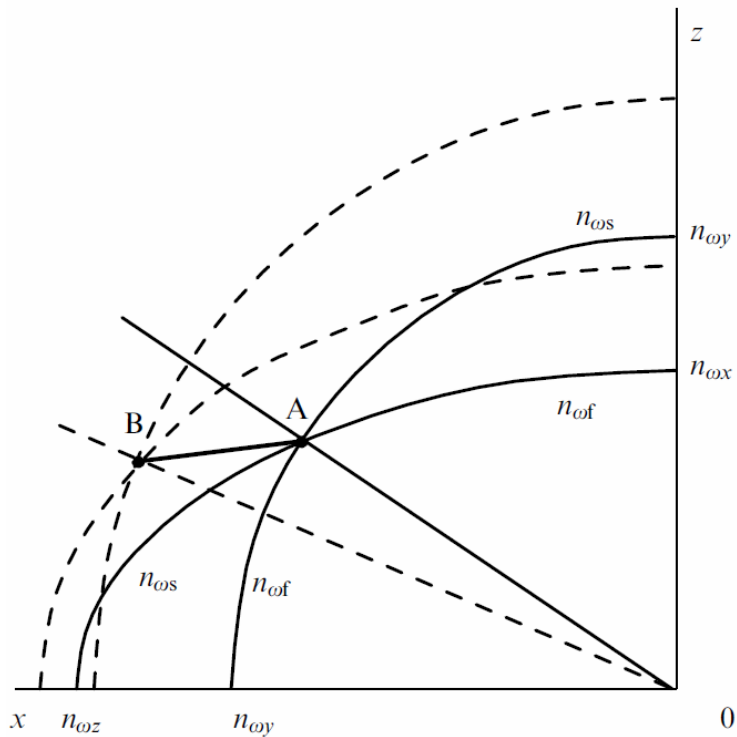


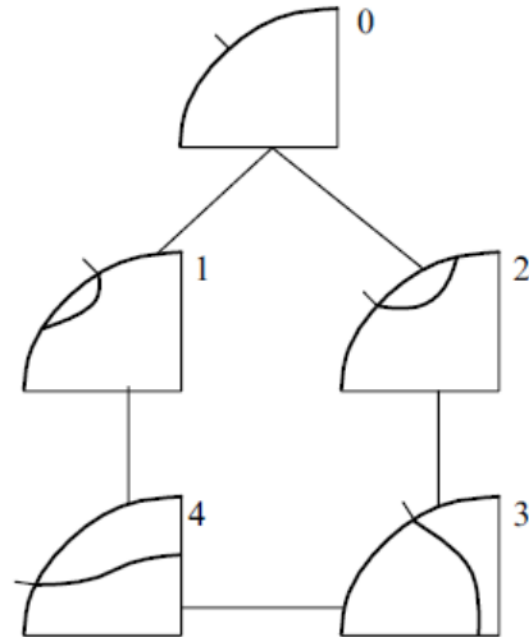
Диаграмма направлений некритичного по температуре двулучепреломления



$d(n_s - n_f)/dT = 0$ - при изменении температуры
разность показателей преломления не
изменяется.

$$dn_s(V_z)/dT \neq dn_f(V_z)/dT$$

$$V_z = V_z(T) \quad n_s(V_z) = n_f(V_z)$$



НКТД только в главных плоскостях !!!

Вдоль оптической оси – $V_z(T)$

Общий вывод

**Для всех процессов,
эффективность которых определяется разностью
волновых векторов Δk ,
в кристаллах может быть получен нечувствительный
по температуре режим:**

ГВГ, ГСЧ, ГРЧ, ПГС, ВКР, ВРМБ, ВТР, ...