

# Интегральный критерий выбора нелинейных кристаллов для преобразования частоты

С.Г.Гречин

*Предложен интегральный критерий выбора нелинейных кристаллов для преобразования частоты, учитывающий все параметры, определяющие эффективность преобразования. Показана связь между угловой шириной синхронизма и углом сноса пучка.*

**Ключевые слова:** преобразование частоты лазерного излучения, ширина синхронизма, нелинейные кристаллы.

За более чем 40-летний период развития методов нелинейно-оптического преобразования частоты были сформулированы критерии, позволяющие определить потенциальные возможности кристаллов при генерации второй и более высокого порядка гармоник как для непрерывного, так и для импульсного лазерного излучения [1–5]. В эти критерии входит совокупность параметров нелинейного кристалла, определяющих эффективность преобразования. Для генерации второй гармоники (ГВГ) в направлении фазового синхронизма (определяемого углами  $\theta$  и  $\varphi$ ) в приближении заданного поля выражение для эффективности преобразования имеет вид [1–5]

$$\eta_p = 240\pi^3 \frac{d_{\text{eff}}^2 L_{\text{cr}}^2}{n^3 \lambda_{10}^2} I_{10}, \quad (1)$$

где  $d_{\text{eff}}$  – коэффициент эффективной нелинейности;  $n$  – показатель преломления кристалла;  $L_{\text{cr}}$  – длина кристалла;  $\lambda_{10}$  – длина волны основного излучения;  $I_{10}$  – интенсивность основного излучения.

Один из широко используемых для сравнения параметров кристалла (показатель качества (FOM)) – коэффициент эффективной нелинейности  $\text{FOM}_1 = d_{\text{eff}}$ . Более точным является параметр  $\text{FOM}_2 = d_{\text{eff}}^2/n^3$ , учитывающий изменение напряженности поля и фазовой скорости в кристалле по отношению к окружающей среде, т. к. величина  $n^3$  для разных кристаллов может различаться в несколько раз.

В дополнение к параметру  $\text{FOM}_2$ , характеризующему нелинейные свойства, используется также ширина синхронизма, определяемая оптическими свойствами кристалла. В зависимости от решаемой задачи это может быть спектральная ширина синхронизма  $2\Delta\lambda_{\text{phm}}$ , угловая ширина синхронизма ( $2\Delta\theta_{\text{phm}}$  для одноосных кристаллов либо один из параметров,  $2\Delta\theta_{\text{phm}}$  или  $2\Delta\varphi_{\text{phm}}$ , для двухосных кристаллов) или температурная ширина синхронизма  $2\Delta T_{\text{phm}}$ . Коэффициент 2 означает, что рассматривается полная ширина синхронизма. Угловая ширина синх-

ронизма обычно определяется вне кристалла для удобства сравнения ее с расходимостью лазерного излучения. Параметр  $2\Delta\lambda_{\text{phm}}$  используется в задачах преобразования частоты излучения УКИ, излучения с широким спектром или перестраиваемого по длине волны излучения. При преобразовании частоты многомодового или сфокусированного излучения используется наименьший из двух параметров –  $2\Delta\theta_{\text{phm}}$  или  $2\Delta\varphi_{\text{phm}}$ . Параметр  $2\Delta T_{\text{phm}}$  используется в задачах преобразования частоты при значительном изменении температуры кристалла.

Соотношения между коэффициентом эффективной нелинейности и шириной синхронизма для разных кристаллов различны, что создает определенные трудности при выборе кристалла. Однако можно выбрать один интегральный параметр, учитывающий разные свойства кристаллов. Рассмотрим, например, случай, когда основной является угловая ширина синхронизма.

Ширина синхронизма определяется как погонный параметр на единицу длины кристалла. Для кристалла длиной  $L_{\text{cr}}$  угловая ширина синхронизма

$$2\Delta\theta_{\text{cr}} = 2\Delta\theta_{\text{phm}}/L_{\text{cr}}. \quad (2)$$

При сравнении кристаллов их длина находится из условия, что ширина пространственного спектра излучения равна угловой ширине синхронизма или не превышает ее. На основе выражений (1) в (2) можно определить интегральный параметр

$$\text{FOM}_{3\theta} = \frac{d_{\text{eff}}^2 (2\Delta\theta_{\text{phm}})^2}{n^3}. \quad (3)$$

Этот параметр характеризует как нелинейные, так и фазосинхронные свойства кристалла. Аналогично можно определить параметр  $\text{FOM}_{3\lambda}$ , учитывающий спектральную ширину синхронизма:  $\text{FOM}_{3\lambda} = d_{\text{eff}}^2 (2\Delta\lambda_{\text{phm}})^2/n^3$ , и  $\text{FOM}_{3T}$ , учитывающий температурную ширину синхронизма:  $\text{FOM}_{3T} = d_{\text{eff}}^2 (2\Delta T_{\text{phm}})^2/n^3$ . Выражение для  $\text{FOM}_{3T}$  учитывает общее изменение температуры кристалла  $T$ , например при изменении температуры окружающей среды. В случае, когда ограничения обусловлены тепловым самовоздействием, при котором температура кристалла определяется средней мощностью лазерного излучения и эффективным коэффициентом поглощения кристалла [6], выражение для комплексного параметра  $\text{FOM}_{3T}$  имеет следующий вид:

С.Г.Гречин. НИИ радиоэлектронной техники МГТУ им. Н.Э.Баумана, Россия, 105005 Москва, 2-я Бауманская ул., 5; e-mail: gera@bmstu.ru

Поступила в редакцию 29 января 2008 г., после доработки – 24 июня 2008 г.

Табл.1. Нелинейные и фазосинхронные свойства кристаллов.

Кристалл	$\lambda_{10}$ (мкм)	Тип синхронизма	$\theta$	$\varphi$	$2\Delta\theta_{\text{phm}}$	$2\Delta\varphi_{\text{phm}}$	$2\Delta\lambda_{\text{phm}}$ (нм)	$2\Delta T_{\text{phm}}$ (°C)	FOM <sub>1</sub>	FOM <sub>2</sub>	FOM <sub>3θ</sub>	FOM <sub>3λ</sub>	FOM <sub>3T</sub>
ADP	1.0642	ооe	42°14'6"	45°	5'22"	–	10.57	1.54	0.39	0.0468	1.35	41.4	0.11
	1.0642	оee	62°23'	0, 90°	11'32"	–	54.02	1.82	0.47	0.0711	9.43	207.2	0.24
	0.5321	ооe	78°33'46"	45°	5'57"	–	0.14	0.37	0.57	0.0911	3.22	$1.7 \times 10^{-3}$	0.013
DKDP	1.0642	ооe	36°33'55"	45°	6'24"	–	5.80	26.76	0.25	0.0197	0.81	0.66	14.1
	1.0642	оee	53°38'23"	0, 90°	11'48"	–	4.96	27.62	0.40	0.0496	6.91	1.22	37.8
	0.5321	ооe	84°34'	45°	12'34"	–	0.14	3.3	0.42	0.051	8.09	$1 \times 10^{-3}$	0.55
LiNbO <sub>3</sub>	1.0642	ооe	83°3'17"	90°	17'20"	–	0.32	1.25	6.24	2.51	754.1	0.26	3.92
LiIO <sub>3</sub>	1.0642	ооe	29°59'26"	–	2'10"	–	0.64	11.21	3.55	1.843	8.65	0.76	231.6
	1.0642	оee	44°0'5"	–	3'41"	–	0.68	8.66	≡ 0	≡ 0	≡ 0	≡ 0	≡ 0
ВВО	1.0642	ооe	22°52'39"	30°	2'54'	–	2.12	29.86	1.7	0.6375	5.36	2.86	568.4
	1.0642	оee	32°33'	0	4'30"	–	2.16	31.25	1.27	0.370	7.49	1.72	361.4
	0.5321	ооe	47°24'58"	30°	57"	–	0.074	5.42	1.32	0.3710	0.33	$2.1 \times 10^{-3}$	10.9
	0.5321	оee	82°12'10"	0	7'05"	–	0.086	6.52	0.03	0.0002	0.01	$1.5 \times 10^{-6}$	0.0084
BiBO	1.0642	ssf	40°44'	0	1'50"	3°28'	0.76	–	2.37	0.932	3.19	0.538	–
	1.0642	sff	53°50'43"	0	3'36"	5°40'	0.776	–	0.53	0.0466	0.604	0.028	–
	1.0642	sff	41°54'53"	47°	4'30"	11'40"	0.871	–	2.11	0.7385	14.95	0.561	–
CLBO	1.0642	ооe	29°11'52"	45°	5'12"	–	3.86	48.68	0.42	0.0537	1.45	0.8	127.3
	1.0642	оee	42°29'28"	0, 90°	8'40"	–	3.85	49.83	0.86	0.2311	17.49	3.42	573.8
	0.5321	ооe	61°26'52"	45°	2'27"	–	0.13	5.32	0.76	0.1699	1.02	$3 \times 10^{-3}$	4.81
LBO	1.0642	ssf	90°	11°36'	4°33'	22'25"	3.8	10.33	0.83	0.1666	83.62	2.41	13.93
KTP	1.0642	sff	90°	22°30'	4°30'	59'11"	0.58	23.11	3.08	1.546	5418.2	0.52	825.7

Примечания. Все ширины синхронизма приведены для кристалла длиной 1 см. Угловые ширины синхронизма даны вне кристалла. Параметр FOM<sub>1</sub> имеет размерность пм·В<sup>-1</sup>, параметр FOM<sub>2</sub> – (пм·В<sup>-1</sup>)<sup>2</sup>, FOM<sub>3θ</sub> – (угл. мин·пм·В<sup>-1</sup>)<sup>2</sup>, FOM<sub>3λ</sub> – (нм·пм·В<sup>-1</sup>)<sup>2</sup> и FOM<sub>3T</sub> – (°С·пм·В<sup>-1</sup>)<sup>2</sup>.

$$\text{FOM}_{3T} = \frac{d_{\text{eff}}^2 (2\Delta T_{\text{phm}})^2}{n^3} \left( \frac{\lambda_T}{\alpha_{\text{eff}}} \right)^2, \quad (4)$$

где  $\lambda_T$  – коэффициент теплопроводности кристалла;  $\alpha_{\text{eff}}$  – эффективный коэффициент поглощения.

В табл.1 приведены параметры некоторых широко распространенных нелинейных кристаллов в случае ГВГ на длинах волн накачки 1.0642 и 0.5321 мкм. Из этих данных, в частности, видно следующее. На длине волны 1.0642 мкм по FOM<sub>1</sub> и FOM<sub>2</sub> в группу лидеров помимо LiNbO<sub>3</sub> и KTP входят кристаллы LiIO<sub>3</sub> и ВВО, но по FOM<sub>3θ</sub> последние два кристалла уступают LBO и CLBO. На длине волны 0.5321 мкм по FOM<sub>1</sub> и FOM<sub>2</sub> лидером является кристалл ВВО, а по параметру FOM<sub>3θ</sub> лидерами становятся кристаллы DKDP, ADP и CLBO. Кристалл ВВО уступает всем им из-за меньшей угловой ширины синхронизма. По FOM<sub>3λ</sub> на длине волны 1.0642 мкм лидером является кристалл ADP, преимущественно из-за большой спектральной ширины синхронизма. Вслед за ним идут кристаллы CLBO, ВВО и LBO.

При преобразовании частоты высокоинтенсивного излучения интенсивность основного излучения с заданным запасом не должна превышать порог разрушения (повреждения) кристалла  $I_{\text{lim}}$ . Порог разрушения является характеристикой среды, и в соответствии с этим из (1) может быть определен параметр FOM<sub>4</sub>. Выражение для аналогичного (3) параметра FOM<sub>4θ</sub>, связанного с угловой шириной синхронизма, имеет следующий вид:

$$\text{FOM}_{4\theta} = \frac{d_{\text{eff}}^2 (2\Delta\theta_{\text{phm}})^2}{n^3} I_{\text{lim}}. \quad (5)$$

Разброс опубликованных значений предельных интенсивностей для кристаллов очень большой. В табл.2 приведены данные для типичных значений  $I_{\text{lim}}$  при длительности импульса 10 нс и  $\lambda_{10} = 1.0642$  мкм.

Табл.2. Показатели качества FOM<sub>4θ</sub> для некоторых кристаллов.

Кристалл	Тип синхронизма	$I_{\text{lim}}$ (ГВт/см <sup>2</sup> )	FOM <sub>4θ</sub> (угл. мин.) <sup>2</sup>
ADP	ооe	1.5	2.02
	оee	1.5	14.1
DKDP	ооe	1.0	0.81
	оee	1.0	6.91
LiNbO <sub>3</sub>	ооe	0.15	113.2
LiIO <sub>3</sub>	ооe	0.05	0.43
ВВО	ооe	3.0	16.1
	оee	3.0	22.5
CLBO	ооe	6.0	8.7
	оee	6.0	104.9
LBO	ssf	2.5	209.1
KTP	sff	0.15	812.73

Если параметр FOM<sub>3θ</sub> характеризует эффективность преобразования излучения с конечной расходимостью или при угловой расстройке, то параметр FOM<sub>4θ</sub> – предельные параметры кристаллов. Соотношения между FOM<sub>3θ</sub> и FOM<sub>4θ</sub> для разных кристаллов различны. Большое значение FOM<sub>3θ</sub> для LiNbO<sub>3</sub> и KTP имеет место только при небольших интенсивностях (до 150 МВт/см<sup>2</sup>). При более высоких интенсивностях лидирующее положение занимают кристаллы LBO и CLBO. При преобразовании частоты коллимированных пучков с высокой интенсивностью, когда угловая ширина синхронизма не ограничивает эффективность преобразования и основное ограничение связано с предельной интенсивностью, показатель качества (5) может быть определен без учета параметра  $2\Delta\theta_{\text{phm}}$ .

При разработке коммерческих лазеров с преобразованием частоты немаловажным является вопрос о стоимости нелинейных кристаллов. В большинстве случаев можно определить полную стоимость кристалла Cs, зная

цену за 1 мм<sup>3</sup> (Pr). Величина Pr различна для разных кристаллов и зависит от технологии выращивания, размеров и оптического качества кристалла. В этом случае вместо FOM<sub>3</sub>, может быть определен показатель качества FOM<sub>Pr</sub> (эффективность – стоимость). Например, вместо FOM<sub>3θ</sub> (3) можно ввести

$$\text{FOM}_{\text{Pr}\theta} = \frac{\text{FOM}_{3\theta}}{C_s} = \frac{d_{\text{eff}}^2 \cdot 2\Delta\theta_{\text{phm}}}{n^3 \text{Pr}}. \quad (6)$$

В отличие от (3) в выражении (6) имеется линейная зависимость от ширины синхронизма, что свидетельствует о предпочтительности кристаллов с большим коэффициентом эффективной нелинейности. Также FOM<sub>Pr</sub> можно определить через спектральную и температурную ширины синхронизма. Необходимо отметить, что, помимо стоимости исходного кристалла, полная стоимость узла преобразования определяется необходимостью термостатирования и капсулирования кристалла, сложностью нанесения покрытий и др.

В выражениях (3)–(6) отсутствует диаметр пучка излучения, т. е. они определены для коллимированного пучка. При преобразовании частоты сфокусированного излучения необходим согласованный учет поперечного размера пучка, расходимости излучения и оптимальной длины кристалла.

Необходимо остановиться еще на одном моменте. В достаточно большом числе работ при сравнении кристаллов авторы отмечают, например, что кристалл характеризуется небольшой угловой шириной и значительным углом сноса. Однако оба эти параметра суть проявление одного и того же свойства анизотропного кристалла – угловой зависимости показателя преломления (пространственной дисперсии среды). В частном случае одноосных кристаллов (или в главных плоскостях двухосных кристаллов) угол сноса

$$\beta = \frac{1}{n_e(\theta)} \frac{dn_e(\theta)}{d\theta}, \quad (7)$$

где  $n_e$  – показатель преломления необыкновенной волны. В общем случае угловая ширина критического синхронизма вне кристалла

$$2\Delta\theta_{\text{phm}} = \lambda_{10} n \left( \frac{d\Delta n}{d\theta} \right)^{-1}. \quad (8)$$

Для первого типа синхронизма выражение для угловой ширины синхронизма с учетом (7) имеет вид

$$2\Delta\theta_{\text{phm}} = 100 \frac{\lambda_{10}}{2|\beta_{2\omega}|}, \quad (9)$$

а для второго типа –

$$2\Delta\theta_{\text{phm}} = 100 \frac{\lambda_{10}}{|2\beta_{2\omega} - \beta_{\omega}|}. \quad (10)$$

Коэффициент 100 в соотношениях (9) и (10) введен потому, что угловая ширина синхронизма традиционно определяется для кристалла длиной 1 см. Из (9) и (10) следует, что угловая ширина синхронизма для второго типа взаимодействия всегда больше, чем для первого.

Нетрудно видеть, что более объективным параметром при учете пространственной дисперсии является не угол сноса, определяемый только первым порядком разложения выражения для показателя преломления и используемый для пучков дифракционного качества, а угловая ширина синхронизма, учитывающая, в наиболее общем случае, все порядки разложения ( $d^m n/d\theta^m$ ) и позволяющая сравнивать ее с расходимостью лазерного излучения. Выражение для «апертурной длины»  $L_a = d_0/\beta$  для пучка лазерного излучения диаметром  $d_0$  справедливо в случае одномодовых пучков и первого типа взаимодействия. Для многомодовых пучков с показателем качества  $M^2$  величина  $L_a = d_0/(\beta_{\omega} M^2)$ . Для второго типа взаимодействия  $L_a = d_0/(|2\beta_{2\omega} - \beta_{\omega}| M^2)$ .

В настоящей работе определены интегральные критерии сравнения кристаллов (параметры FOM) для ГВГ лазерного излучения. Приведены данные для широко используемых кристаллов. Аналогично параметры FOM можно определить для задач генерации суммарных и разностных частот. Показана связь между угловой шириной синхронизма и углом сноса пучка. Все результаты расчетов были получены с использованием справочно-расчетного пакета программ LID-FC (Laser Investigator & Designer – Frequency Conversion) [7].

1. Ахманов С.А., Хохлов Р.В. *Проблемы нелинейной оптики* (М.: ВИНТИ, 1964).
2. Бломберген Н. *Нелинейная оптика* (М.: Мир, 1964).
3. Цернике Ф., Мидвинтер Дж. *Прикладная нелинейная оптика* (М.: Мир, 1976).
4. Дмитриев В.Г., Тарасов Л.В. *Прикладная нелинейная оптика* (М.: Физматлит, 2004).
5. Dmitriev V.G., Gurzadyan G.G., Nikogosyan D.N. *Handbook of Nonlinear Optical Crystals* (Berlin–Heidelberg–New York: Springer, 1999).
6. Мезенов А.В., Сомс, Л.Н., Степанов А.И. *Термооптика твердотельных лазеров* (Л.: Машиностроение, 1986).
7. <http://www.bmstu.ru/~lid>.