

Генерация гармоник фемтосекундного излучения в условиях группового синхронизма в одноосных и двухосных кристаллах

С.С.Гречин, В.И.Прялкин

Приведены результаты расчета групповых синхронизмов для генерации второй гармоники фемтосекундных лазерных импульсов в 62 нелинейно-оптических кристаллах. Рассчитаны угловая, спектральная и температурная ширины синхронизма, а также эффективная нелинейность. Определены кристаллы для эффективной генерации второй, третьей, четвертой и пятой гармоник излучения фемтосекундного хром-форстеритового лазера.

Ключевые слова: генерация гармоник, фемтосекундное излучение, групповой синхронизм, одноосные и двухосные кристаллы.

1. Введение

Фемтосекундные лазерные системы на основе титан-сапфира ($\text{Ti} : \text{Al}_2\text{O}_3$) и хром-форстерита ($\text{Cr}^{4+} : \text{Mg}_2\text{SiO}_4$) с нелинейным преобразованием частоты позволяют получать сверхкороткие световые импульсы в широком диапазоне спектра: от ультрафиолетового до среднего инфракрасного [1, 2]. Важную роль при этом играет выбор нелинейного кристалла, в котором можно получить высокую эффективность преобразования без искажения временных и пространственных характеристик импульса. Такой выбор для преобразователей фемтосекундного излучения требует знания не только традиционных параметров кристалла-преобразователя (угловой, спектральной и температурной ширины синхронизма, эффективной нелинейности), но и учета расстройки групповых скоростей и дисперсионного расплывания взаимодействующих импульсов [3].

Исследование дисперсионных свойств 27 одноосных и 14 двухосных кристаллов с целью поиска режимов, для которых возможно выполнение условий группового синхронизма в случае коллинеарной генерации второй гармоники (ГВГ) первого типа, было проведено в работе [4]. Однако в этой работе отсутствуют сведения о таких параметрах синхронизма, как угловая, спектральная и температурная ширины, а также сведения о коэффициенте эффективной нелинейности и длине дисперсионного расплывания. В последнее время появились новые нелинейные кристаллы и были уточнены дисперсионные характеристики ранее использовавшихся кристаллов. Предметом настоящей работы является исследование дисперсионных свойств одноосных и двухосных кристаллов для определения возможности реализации в них режима группового синхронизма первого типа при коллинеарной ГВГ, нахождение параметров такого синхронизма, а

также выбор оптимальных преобразователей для коллинеарной генерации гармоник излучения хром-форстеритового лазера.

2. Дисперсионные свойства кристаллов

Для эффективного преобразования частоты фемтосекундных лазерных импульсов без искажения их формы, кроме выполнения условия фазового синхронизма и наличия ненулевого нелинейного отклика среды, необходимо, чтобы спектральная ширина синхронизма для данного режима взаимодействия была больше ширины спектра волны накачки. В режиме не критичного по длине волны взаимодействия достигается максимальная для данного кристалла спектральная ширина синхронизма. Условие не критичного по длине волны скалярного синхронизма первого типа при ГВГ имеет вид:

$$\frac{d\Delta k}{d\omega} = 0, \quad (1)$$

где $\Delta k = k_{2\omega} - k_{\omega}$; k_{ω} , $k_{2\omega}$ – модули волновых векторов волн основного излучения и второй гармоники; ω – частота основного излучения.

При первом типе взаимодействия это условие эквивалентно условию группового синхронизма, когда групповые скорости ($u_{\text{gr}} = c(\partial k / \partial \omega)^{-1}$) взаимодействующих волн равны:

$$\left. \frac{\partial k}{\partial \omega} \right|_{\omega} = \left. \frac{\partial k}{\partial \omega} \right|_{2\omega}. \quad (2)$$

В случае невыполнения этого условия будет иметь место эффект группового разбегания импульсов. Этот эффект характеризуется длиной группового разбегания

$$L_{\text{gr}}^{i,j} = \frac{\tau_0}{|1/u_i - 1/u_j|}, \quad (3)$$

где τ_0 – длительность импульса накачки; i, j – индексы взаимодействующих импульсов.

С.С.Гречин, В.И.Прялкин. Физический факультет и Международный учебно-научный лазерный центр МГУ им. М.В.Ломоносова, Россия, 119992 Москва, Воробьевы горы; e-mail: grechin@psi.phys.msu.ru

Поступила в редакцию 3 октября 2002 г., после доработки – 14 марта 2003 г.

В случае второго типа взаимодействия условие (1) соответствует условию режима преобразования с компрессией, когда групповые скорости импульсов не равны, но $u_1^\omega - u_3^{2\omega} = -u_3^{2\omega} - u_2^\omega$. Режим преобразования с компрессией характерен тем, что, несмотря на неравенство групповых скоростей, возможна эффективная генерация фемтосекундных импульсов без искажения формы. Таким образом, видно, что условие группового синхронизма и условие режима преобразования с компрессией являются следствиями условия некритичного по длине волны синхронизма. Спектральная ширина синхронизма характеризует также дисперсионные свойства высоких порядков, такие как дисперсионное расплывание. Например, возможен режим, при котором, несмотря на наличие некритичного по длине волны синхронизма, спектр импульса шире, чем спектральная ширина синхронизма (случай очень короткого импульса). При этом недостаточно большая спектральная ширина синхронизма обусловлена большой величиной $\partial^2 \Delta k / \partial \omega^2$. Следовательно, преобразование будет происходить с искажением спектра. Во временном представлении это соответствует случаю, когда длина дисперсионного расплывания

$$L_{\text{disp}} = \frac{\tau_0^2}{2} \left| \frac{\partial^2 k}{\partial \omega^2} \right| \quad (4)$$

для одного из импульсов значительно меньше, чем для другого.

Аналогичные результаты можно получить и для случая генерации суммарной и разностной частоты. В невырожденных случаях преобразования частоты возможны режимы некритичного по длине волны синхронизма при варьировании только по длине волны. Это соответствует режимам, когда лишь для одной пары взаимодействующих импульсов выполняется условие равенства групповых скоростей.

3. Групповой синхронизм первого типа при ГВГ

Как уже было отмечено выше, использование явления группового синхронизма позволяет существенно повысить эффективность преобразования. Поэтому было проведено исследование свойств одноосных и двухосных кристаллов с целью поиска режимов, для которых возможно выполнение условий группового синхронизма первого типа при ГВГ.

Групповые скорости вычислялись вдоль направления фазового синхронизма $2k_1 = k_2$, т. е. находились условия одновременного выполнения фазового и группового синхронизма. Для одноосных кристаллов групповой синхронизм, если он существует, возможен только на одной длине волны. Как было показано в [5, 6], длина кристалла-преобразователя фемтосекундных импульсов должна быть по крайней мере на порядок меньше L_{gr} . Если взять за практический критерий длины кристалла-преобразователя импульсов длительностью 100 фс длину 1 мм, то можно считать, что режим преобразования, близкий к режиму группового синхронизма (квазистатический режим), для одноосных кристаллов выполняется в диапазоне длин волн, для которых $L_{\text{gr}} > 1$ см. В табл.1 приведены значения длин волн λ_{gvm} , для которых имеет место групповой синхронизм при ГВГ первого типа, а также соответствующие углы синхронизма, угловая, спектраль-

ная и температурная ширины, дисперсионные длины и коэффициенты эффективной нелинейности d_{eff} . Здесь и далее для угловой ширины синхронизма приведены значения внутри кристалла. Угол φ выбирался из условия максимального d_{eff} . Показатели преломления рассчитывались по формулам Зельмейера (Sellmeir), взятым из работ, указанных в последнем столбце табл.1. Для некоторых кристаллов (например, для кристалла KDP) расчет проведен по формулам Зельмейера, взятым из разных работ, но дающим примерно одинаковые результаты, близкие к экспериментальным данным, приведенным в [7]. В кристаллах мочевины ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$) [15], теллура (Te), ангидрида 2-фурил метакриловой кислоты (FMA) групповой синхронизм первого типа при ГВГ невозможен.

Число двухосных кристаллов, в которых возможна реализация группового синхронизма, меньше, чем одноосных, но в двухосных кристаллах точный групповой синхронизм реализуется не на фиксированной длине волны, а в некотором диапазоне длин волн. В табл.2 приведены диапазоны длин волн, в пределах которых будет иметь место групповой синхронизм. Для некоторых кристаллов групповой синхронизм возможен для двух разных длин волн при одном и том же угле среза кристалла φ , т. е. существуют две ветви группового синхронизма. В табл.2 они обозначены как ssf_1 и ssf_2 [16]. В случае, когда внутри указанного диапазона длин волн имеется максимум коэффициента эффективной нелинейности d_{eff} , указана также длина волны, для которой это имеет место. Также приведены значения углов синхронизма, угловых, спектральных и температурных ширин, коэффициентов эффективной нелинейности, соответствующих указанным длинам волн. Показатели преломления кристаллов рассчитывались по формулам Зельмейера, взятым из работ, указанных в последнем столбце табл.2.

В кристаллах KB5 ($\text{KB}_5\text{O}_8 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$), MgBaF_4 , LFM ($\text{LiCOOH} \cdot \text{H}_2\text{O}$), NaCOOH , $\text{Ba}(\text{COOH})_2$, KLN ($\text{K}_2\text{La}(\text{NO}_3)_5 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), KNbO_3 , NPL0 (L-N-(5-нитро-2-пиридил)лейцинол), NaNO_2 , банан ($\text{Ba}_2\text{NaNb}_5\text{O}_{15}$), KCN ($\text{K}_2\text{Cr}(\text{NO}_3)_5 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), LAP (моногидрат фосфата L-аргинина), DLAP (дейтерированный моногидрат фосфата L-аргинина), L-PCA (L-пирролидон-2-карбоновая кислота), L-CTT ($\text{CaC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), T-17 (тиенилхалкон), PNP (2-(N-пролинол)-5-нитропиридин), DAN (4-(N,N-диметаламино)-3-ацетамидонитробензол), $\alpha\text{-HIO}_3$, MMONS (3-метил-4-метокси-4'-нитростильбен), SrBaO_7 групповой синхронизм первого типа при ГВГ невозможен.

Для ряда кристаллов отсутствуют данные о температурной зависимости показателей преломления или о коэффициентах тензора эффективной нелинейности, поэтому температурная ширина синхронизма и коэффициент d_{eff} для них не рассчитывались.

Полученные результаты могут служить ориентиром при предварительном выборе кристаллов для удвоителей частоты фемтосекундных импульсов. Так, например, исходя из рассчитанных данных можно сделать вывод, что для получения второй гармоники от излучения хромфорстеритового лазера наиболее подходящими являются следующие кристаллы: CLBO, CDA, DCDA, ADA, DADA, KDP, DKDP, RDA, DRDA, LBO, сахароза, POM. Среди перечисленных следует особо отметить кристаллы LBO и частично дейтерированный кристалл DCDA, в которых может быть реализован групповой синхронизм [19, 20]. Для ГВГ излучения титан-сапфирового лазера такие кристаллы отсутствуют.

Табл.1. Групповой синхронизм при ГВГ в одноосных кристаллах.

Кристалл	λ_{gvm} (нм)	λ_{left} (нм)	λ_{right} (нм)	θ (угл. град.)	$\Delta\theta$ (угл. град.)	$\Delta\lambda$ (нм)	ΔT (°C)	d_{eff} (пм/В)	$L_{\text{disp}}(\omega)$ (см)	$L_{\text{disp}}(2\omega)$ (см)	Литера- тура
ADA (NH ₄ H ₂ AsO ₄)	1140	1120	1180	41.4	0°3'12"	49	1.8	0.30	94.4	4.55	[7]
ADP (NH ₄ H ₂ PO ₄)	1013	981	1049	42.1	0°3'22"	43	1.5	0.38	70.4	5.7	[7]
AgGaS ₂	4360	4153	4641	30.7	0°13'55"	492	77.7	6.90	49.0	2.25	[8]
AgGaSe ₂	6117	5790	6499	39.4	0°29'58"	853	20.6	20.77	40.3	1.75	[8]
BBO (β-BaB ₂ O ₄)	1476	1404	1540	20.5	0°2'43"	93	61.4	2.09	161.3	6.1	[9]
BBO	1542	1470	1623	19.8	0°2'54"	104	68.1	2.11	135.2	833	[7]
CDA (CsH ₂ AsO ₄)	1210	1173	1247	78.9	0°23'37"	57	8.4	0.40	833.0	4.75	[10]
CDA	1384	1265	1430	74.3	0°20'26"	162	10.0	0.39	4.2	5.95	[11]
CdGeAs ₂	9380	9156	9618	32.9	0°18'19"	1100	–	214.3	4.0	0.55	[7]
CLBO (CsLiB ₆ O ₁₀)	1388	1287	1480	27.1	0°4'53"	101	42.2	0.39	384.6	9.15	[7]
CLBO	1268	1205	1351	27.6	0°4'21"	88	37.4	0.40	263.2	8.85	[12]
DADA (NH ₄ D ₂ AsO ₄)	1260	1225	1304	37.5	0°3'52"	63	–	0.27	104.2	5.1	[7]
DADP (ND ₄ D ₂ PO ₄)	1170	1124	1225	36.5	0°4'18"	64	–	0.31	98.1	7.25	[7]
DCDA (CsD ₂ AsO ₄)	1335	1284	1398	69.5	0°16'47"	77	10.2	0.38	60.3	454	[11]
DCDA	1324	1271	1375	70.0	0°16'56"	72	10.0	0.38	454.0	5.5	[10]
DKDP (KD ₂ PO ₄)	1230	1142	1259	36.0	0°5'4"	71	23.7	0.25	82.0	8.4	[10]
DRDA (RbD ₂ AsO ₄)	1370	1306	1427	34.6	0°5'49"	81	–	0.24	333.4	6.2	[7]
DRDP (RbD ₂ PO ₄)	1183	1125	1241	46.5	0°6'39"	69	–	0.27	100.5	8.0	[7]
HgGa ₂ S ₄	4740	4631	5163	31.5	0°19'15"	604	–	19.10	15.6	2.3	[7]
HgS	5728	5456	6016	14.3	0°8'13"	742	–	47.13	16.0	1.8	[7]
KDA (KH ₂ AsO ₄)	1185	1147	1218	39.4	0°3'29"	55	7.3	0.33	166.7	5.0	[7]
KDP (KH ₂ PO ₄)	1041	1005	1086	40.9	0°3'47"	49	10.4	0.47	142.9	6.7	[11]
KDP	1041	1006	1084	40.9	0°3'48"	50	10.4	0.47	161.3	6.35	[10]
LiIO ₃	2166	2067	2260	19.2	0°3'27"	158	75.3	2.74	111.1	3.9	[13]
LiIO ₃	2058	1976	2140	19.7	0°3'8"	141	68.0	2.84	151.5	3.73	[14]
LiNbO ₃ (Li/Nb = 1)	2015	1965	2061	44.5	0°3'52"	93	4.1	5.00	45.9	1.75	[7]
LiNbO ₃ :MgO	1808	1775	1848	46.1	0°3'22"	73	–	4.8	63.3	1.6	[7]
Пираргерит	7826	7573	8111	19.0	0°13'14"	894	–	8.95	4.1	0.85	[7]
Прустит	5566	5296	5792	14.7	0°7'7"	669	–	2.8	19.5	1.6	[7]
RDA (RbH ₂ AsO ₄)	1187	1147	1224	48.6	0°5'0"	56	7.8	0.30	714.0	5.05	[7]
RDP (RbH ₂ PO ₄)	1074	1026	1134	51.0	0°5'44"	61	7.6	0.31	17.1	7.15	[7]
RDP	1054	1013	1096	51.1	0°5'37"	51	7.5	0.31	> 1000	6.9	[11]
BeSO ₄ ·4H ₂ O	1002	964	1036	41.6	0°3'45"	46	–	0.17	94.4	7.1	[7]
TAS (Tl ₃ AsS ₃)	9058	8866	9345	18.42	0°11'27"	1123	42.8	–	2.2	0.7	[7]
ZnGeP ₂	5814	5625	6014	46.5	0°23'8"	627	15.6	75.30	7.7	1.22	[7]

Примечание: λ_{gvm} – длина волны группового синхронизма; λ_{left} , λ_{right} – левая и правая границы диапазона длин волн, для которого $L_{\text{gr}}(\tau_0 = 100 \text{ фс}) > 1 \text{ см}$; θ – угол синхронизма; $\Delta\theta$ – угловая ширина синхронизма; $\Delta\lambda$ – спектральная ширина синхронизма; ΔT – температурная ширина синхронизма; d_{eff} – коэффициент эффективной нелинейности; $L_{\text{disp}}(\omega)$, $L_{\text{disp}}(2\omega)$ – длины дисперсионного расплывания на длинах волн λ_{gvm} и $\lambda_{\text{gvm}}/2$ соответственно.

4. Анализ дисперсионных свойств кристаллов для выбора эффективных преобразователей частоты излучения лазера на хром-форстерите в третью, четвертую и пятую гармоники

К настоящему времени проведен подробный анализ дисперсионных свойств кристаллов для выбора умножителей частоты фемтосекундного излучения лазера на титан-сапфире (см., напр., [2]), тогда как такой анализ для преобразователей частоты излучения хром-форстеритового лазера отсутствует.

Выбор кристаллов для эффективных преобразователей излучения хром-форстеритового лазера в третью гармонику был осуществлен на основе расчета групповых длин взаимодействующих волн ($\lambda_1 = 1250 \text{ нм}$, $\lambda_2 = 625 \text{ нм}$, $\lambda_3 = 417 \text{ нм}$) в различных кристаллах (табл.3 и 4).

В этих таблицах также приведены значения углов синхронизма и величины d_{eff} . Аналогичный расчет был сделан и для генерации четвертой гармоники (ГЧГ). Для генерации пятой гармоники (ГПГ) были рассмотрены два случая – генерация пятой гармоники как суммы ω и 4ω и как суммы 2ω и 3ω . Поскольку при генерации третьей гармоники (ГТГ) и ГПГ две волны накачки двигаются с разными скоростями, то в табл.4 приведены групповые длины для каждой пары взаимодействующих импульсов.

Для того чтобы сравнивать кристаллы одновременно по их нелинейным и дисперсионным свойствам, введем характеристический коэффициент $K = d_{\text{eff}}^2 L_{\text{gr}}^2 / n^3$ (пм²·В⁻²·см²). Чем больше этот коэффициент, тем более эффективную генерацию гармоник следует ожидать. В случае ГТГ и ГПГ в качестве L_{gr} выбирается наименьшая из трех групповых длин. В табл.5 приведен список кристаллов с наибольшими характеристическими коэффициентами для случаев ГТГ, ГЧГ и ГПГ (при $(\omega + 4\omega)$ и

Табл.2. Групповой синхронизм при ГВГ в двухосных кристаллах.

Кристалл	λ_{gvm} (нм)	ϕ (угл. град)	θ (угл. град.)	d_{eff} (пм/В)	$\Delta\varphi$ (угл. град.)	$\Delta\theta$ (угл. град.)	$\Delta\lambda$ (нм)	ΔT (°C)	Литера- тура
LBO (LiB ₃ O ₅) ssf ₁	1261	0	33.6	0	3.8	0.08	76.3	5.45	[7]
	1267	19.40	39.2	0.11	0.2	0.13	76.9	6.74	
	1283	25.7	51.9	0.07	0.1	3.07	78.69	18.73	
LBO ssf ₂	1307	0	86.2	0.97	3.7	0.62	80.0	8.93	
	1284	25.7	52.9	0.10	0.1	3.12	78.7	21.97	
КТР (КТiOPO ₄) рост из расплава	1888	0	36.5	0	5.7	0.06	112.3	318.10	[7]
	1865	37	32.1	1.03	0.4	0.07	110.7	20.42	
	1838	90	25.0	0	7.4	0.08	109.0	9.51	
КТР гидротермальный рост	1890	0	36.1	0	5.8	0.06	111.5	213.90	[7]
	1878	36	32.0	1.03	0.4	0.07	112.2	21.97	
	1862	90	24.9	0	7.6	0.08	113.2	9.65	
КТА (КТiOAsO ₄)	1931	0	36.9	0	6.3	0.06	115.2	–	[7]
	1901	31	34.1	0.33	0.4	0.07	112.9	–	
	1843	90	26.7	0	7.7	0.08	108.4	–	
RTA (RbTiOAsO ₄)	1943	0	39.0	0	5.9	0.07	109.5	–	[7]
	1997	27.9	36.1	1.08	0.4	0.08	122.0	–	
	2163	90	26.1	0	8.2	0.11	158.8	–	
СВО (CsB ₃ O ₅) ssf ₁	1574	0	25.8	0	4.3	0.09	118.1	–	[17]
	1768	23	37.4	0.69	0.2	2.75	18.0	–	
СВО ssf ₂	1468	0	54.4	1.02	2.8	0.07	96.6	–	
	1766	23	38.0	0.67	0.2	2.49	17.8	–	
СТА (CsTiOAsO ₄)	1902	0	50.2	0	4.3	0.07	107.5	–	[7]
	1941	44	36.5	0.52	0.2	0.11	111.2	–	
	1956	90	23.8	0	7.1	0.13	112.9	–	
LiInS ₂ ssf ₁	3724	0	44.4	3.71	5.7	0.23	428.0	–	[18]
	3684	27.75	73.8	0.13	0.3	9.46	402.9	–	
LiInS ₂ ssf ₂	3678	27.3	89.5	0.004	0.3	12.88	399.3	–	
	3683	27.75	74.4	0.11	0.3	9.96	403.2	–	
Сахароза	1350	26	58.7	–	0.2	0.22	94.0	–	[7]
	1248	32	78.7	–	0.1	1.60	72.7	–	
РОМ (3-метил-4-нитропири- дин-1-оксид) ssf ₁	1262	0	11.9	0	4.5	0.04	31.7	–	[7]
	1297	32	19.4	4.95	0.1	0.12	35.3	–	
РОМ ssf ₂	1779	0	41.7	0.001	2.4	0.03	69.7	–	
	1751	10	40.6	9.28	0.2	0.03	70.5	–	
	1378	32	26.5	3.49	0.1	0.11	45.4	–	
5-нитроурацил (5NU)	1418	0	36.9	8.06	0.8	0.01	41.6	–	[7]
	1528	7	39.0	0.94	0.03	0.02	64.4	–	
МАР (метил-(2,4-динитро- фенил)-амино-2-проаноат) ssf ₁	1769	0	29.1	0	1.3	0.02	83.3	–	[7]
	1770	10	32.3	1.54	0.04	0.04	78.5	–	
	1771	11	33.9	0.76	0.03	0.10	75.9	–	
МАР ssf ₂	1770	0	42.1	11.38	1.01	0.02	63.3	–	
	1771	11	36.3	1.32	0.03	0.09	72.2	–	
NPP (N-(4-нитрофенил)-L-про- линол)	1589	0	37.6	–	0.9	0.01	34.7	–	[7]
	1839	12	33.5	–	0.02	0.02	64.4	–	

($2\omega + 3\omega$). Из анализа результатов расчета можно сделать вывод, что для эффективной ГВГ излучения лазера на хром-форстерите можно использовать кристаллы CLBO, CDA, DCDA, ADA, DADA, KDP, DKDP, RDA, DRDA, LBO, для ГТГ – ADP, BBO, LBO, для ГЧГ – BBO, LiIO₃, для ГПГ по схемам ($\omega + 4\omega$) и ($2\omega + 3\omega$) – BBO, KDP, CLBO. Причем характеристический коэффициент в случае ГПГ как суммы второй и третьей гармоник больше, чем для ГПГ как суммы излучения на основной длине волны и четвертой гармоники. Следует отметить, что выбор кристаллов проводился на основании только диспер-

сионных свойств и величин эффективных нелинейностей и не учитывал такие эффекты, как двухфотонное поглощение, самовоздействие, пробой и т. п., учет которых обязателен при окончательном выборе кристалла.

5. Выводы

В работе выполнен расчет длин волн группового синхронизма при ГВГ первого типа в 31 одноосном и 31 двухосном кристаллах, из которых только в 28 одноосных и 12 двухосных кристаллах возможна его реализация.

Табл.3. Нелинейные и дисперсионные свойства одноосных кристаллов для ГТГ.

Кристалл	θ (угл. град.)	L_{gr}^{12} (см)	L_{gr}^{13} (см)	L_{gr}^{23} (см)	d_{eff} (пм/В)
ADA	45.8	0.15	0.06	0.11	0.32
ADP	43.8	0.61	0.17	0.24	0.39
BBO	26.6	0.10	0.04	0.08	2.39
CLBO	33.5	0.17	0.08	0.15	0.48
DADP	40.6	0.23	0.10	0.17	0.34
DKDP	40.6	0.23	0.10	0.18	0.27
DRDA	55.1	0.12	0.05	0.10	0.25
DRDP	51.9	0.22	0.11	0.22	0.30
KDA	44.4	0.14	0.06	0.11	0.36
KDP	42.7	0.40	0.16	0.26	0.48
LiIO ₃	36.9	0.03	0.01	0.02	5.06
RDA	55.7	0.14	0.06	0.12	0.33
RDP	53.8	0.33	0.15	0.27	0.33
BeSO ₄ ·4H ₂ O	43.1	0.94	0.22	0.30	0.17
Urea	27.7	0.09	0.02	0.03	1.07

Табл.4. Нелинейные и дисперсионные свойства двухосных кристаллов для ГТГ.

Кристалл	ϕ (угл. град.)	θ (угл. град.)	L_{gr}^{12} (см)	L_{gr}^{13} (см)	L_{gr}^{23} (см)	d_{eff} (пм/В)
Ba(COOH) ₂	19.2	90	0.07	0.03	0.16	0.07
CBO	0	64.9	0.10	0.05	0.10	0.82
KNbO ₃	90	73.4	0.002	0.002	0.008	12.66
KTA	45	64.3	0.03	0.01	0.02	0.37
KTP	45	58.2	0.03	0.01	0.03	0.76
LBO	27.8	90	0.17	0.08	0.14	0.89
RTA	54	71.8	0.02	0.01	0.02	0.79
NaCOOH	8	67.3	0.10	0.16	0.06	0.17

Для длин волн группового синхронизма рассчитаны такие параметры синхронизма, как спектральная, температурная и угловые ширины, а также коэффициент эффективной нелинейности. Полученные результаты могут служить ориентиром при выборе кристалла для эффективной генерации ГВГ первого типа.

Также в работе проведено исследование дисперсионных свойств кристаллов с целью выбора оптимальных генераторов гармоник излучения хром-форстеритового лазера. Показано, что для ГВГ предпочтительным является использование кристалла LBO, а для ГТГ, ГЧГ и ГПГ – кристалла ВВО.

Следует отметить, что значения групповых и дисперсионных длин, приведенные в работе, рассчитывались для взаимодействующих импульсов длительностью 100 фс. Поскольку $L_{gr} \sim \tau_0$ и $L_{disp} \sim \tau_0^2$, то соответствующие величины для взаимодействующих импульсов другой длительности можно рассчитать, пользуясь приведенными в работе данными.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 00-02-17269).

- Petrov V., Rotermund F., Noack F., Ringling J., Kittelmann O., Komatsu R. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **5**, 1532 (1999).
- Rotermund F., Petrov V., Noack F., Isaenko L., Yelissev A., Lobanov S. *Appl. Phys. Lett.*, **78**, 2623 (2001).
- Ахманов С.А., Выслоух В.А., Чиркин А.С. *Оптика фемтосекундных лазерных импульсов* (М.: Наука, 1988).
- Лукашев А.А., Магницкий С.А., Прялкин В.И. *Изв. РАН. Сер. физич.*, **59** (12), 123 (1995).
- Gordienko V.M., Magnitskii S.A. *Techn. Dig. CLEO* (Amsterdam: Europe-EQEC, 1994, p. 240).
- Lukashev A.A., Magnitskii S.A., Pryalkin V.I. *Techn. Dig. 1st Ann. Intern. Conf. «Solid-State Lasers for Application to Internal Confinement Fusion (ICF)»* (Monterey, CA, 1995, p. 33).
- Dmitriev V.G., Gurzadyan G.G., Nikogosyan D.N. *Handbook of Nonlinear Optical Crystals* (Berlin: Springer-Verlag, 1999).
- Bhar G.C. *Appl. Opt.*, **15**, 305 (1976).
- Eimerl D., Davis L., Velsko S., Graham E.K., Zaikin A. *J. Appl. Phys.*, **62**, 1968 (1987).
- Kirby K.W., Hoeffler C.S., Deshazer L.G. *Refractive Indices and Thermo-optic Coefficient of Nonlinear Crystal Isomorphous to KH₂PO₄* (Final report, Lawrence Livermore National Laborat., 1985).
- Eimerl D. *Ferroelectrics*, **72**, 95 (1987).
- Umamura N., Kato K. *Appl. Opt.*, **36**, 6794 (1997).
- Kato K. *IEEE J. Quantum Electron.*, **21**, 119 (1985).
- Buesener H., Renn A., Brieger M., Moers V., Hesel A. *Appl. Phys. B.*, **39**, 77 (1986).
- Halbout J.M., Blit S., Donaldson W., Tang C.L. *IEEE J. Quantum Electron.*, **15**, 1176 (1979).
- Гречин С.Г., Гречин С.С., Дмитриев В.Г. *Квантовая электроника*, **30** (5), 377 (2000).
- Wu Y., Sasaki T., Nakai S., Yokotani A., Tang H., Chen C. *Appl. Phys. Lett.*, **63**, 2614 (1993).
- Андреев Ю.М., Гейко Л.Г., Гейко П.П., Гречин С.Г. *Квантовая электроника*, **31** (7), 647 (2001).
- Гордиенко В.М., Иванов А.А., Подшивалов А.А., Прялкин В.И. *Квантовая электроника*, **31** (5), 391 (2001).
- Gordienko V.M., Grechin S.S., Pryalkin V.I. *Techn. Dig. IQEC/LAT* (Moscow, 2002, p. 51).

Табл.5. Характеристические коэффициенты кристаллов для ГВГ, ГТГ, ГЧГ и ГПГ.

ГВГ	ГТГ		ГЧГ		ГПГ ($\omega + 4\omega$)		ГПГ ($2\omega + 3\omega$)		
	Кристалл	$K (10^3 \text{ пм}^2 \times \text{В}^{-2} \cdot \text{см}^2)$	Кристалл	$K (10^3 \text{ пм}^2 \times \text{В}^{-2} \cdot \text{см}^2)$	Кристалл	$K (10^3 \text{ пм}^2 \times \text{В}^{-2} \cdot \text{см}^2)$	Кристалл	$K (10^3 \text{ пм}^2 \times \text{В}^{-2} \cdot \text{см}^2)$	
LBO	282	BBO	2.778	BBO	1.027	BBO	0.086	BBO	0.150
DADA	154	ADP	1.389	LiIO ₃	0.573	KDP	0.050	KDP	0.147
POM	147	LBO	1.122	KDP	0.374	CLBO	0.042	CLBO	0.103
ADA	58.0	LiIO ₃	1.042	CBO	0.335	CBO	0.039		
CDA	32.9	BeSO ₄ ·4H ₂ O	0.490						