

П.П. Гейко, Е.П. Коцубинская

Новые двуосные смешанные кристаллы для преобразования частоты фемтосекундных импульсов

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, г. Томск

Поступила в редакцию 30.11.2005 г.

Исследованы возможности преобразования частоты излучения фемтосекундных импульсов в ряде сравнительно недавно изученных двуосных кристаллов LiInS_2 , LiInSe_2 , LiGaS_2 , LiGaSe_2 , AgGaGeS_4 и новых смешанных кристаллов $\text{LiIn}(\text{S}_x\text{Se}_{1-x})_2$ и $\text{LiGa}(\text{S}_x\text{Se}_{1-x})_2$. Основное внимание уделено получению перестраиваемого по частоте излучения в ближнем и среднем ИК-диапазонах путем параметрической генерации с накачкой излучением Ti:Sapphire-лазера. Найдены условия фазового и группового синхронизмов и возможности их одновременного выполнения, оценена потенциальная эффективность преобразователей частоты.

Введение

В последние годы созданы компактные мощные лазерные системы, излучающие импульсы фемтосекундного диапазона длительностей. Благодаря этому появилась возможность начать исследования вещества в ранее недостижимых экстремальных условиях [1]. Речь, прежде всего, идет о твердотельных лазерах на основе широкополосных активных сред Ti:Sapphire ($\lambda = 0,75 \pm 1$ мкм) и Cr:Forsterite (1,2–1,32 мкм) [2]. Преобразование частоты излучения этих, в настоящее время ставших базовыми, источников сверхкоротких импульсов в другие спектральные диапазоны с использованием нецентросимметричных нелинейных кристаллов выглядит довольно привлекательным, особенно при условии сохранения временных параметров преобразованного излучения. Такие источники явились бы незаменимым средством исследования сверхбыстродействующих полупроводниковых элементов для систем оптической связи, ключевыми компонентами лидаров нового поколения и т.д. Однако энергия импульсов излучения среднего ИК-диапазона, полученных путем прямого и каскадного преобразования частоты упомянутых лазеров, не превышает 10 нДж [3]. Проблема прежде всего состоит в отсутствии подходящих нелинейных кристаллов, позволяющих в полной мере использовать свойства групповых синхронизмов взаимодействующих волн [4].

Цель настоящей работы заключается в поиске и исследовании нелинейных кристаллов, в которых возможно эффективное однокаскадное преобразование частоты Ti:Sapphire- и Cr:Forsterite-лазеров в режиме группового синхронизма. Очевидно, что поиск следует вести прежде всего среди двуосных нелинейных кристаллов, поскольку в них возможности отыскать направления, в которых одновременно реализуются условия фазового и группового синхронизмов, гораздо шире, чем в одноосных кристаллах.

Совсем недавно появились сообщения о реальном применении новых нелинейных кристаллов LiInS_2

[6, 7], LiInSe_2 [8–10], AgGaGeS_4 [11–14] для преобразования частоты лазерного излучения, в том числе в отдельных случаях и излучения субпикосекундного диапазона. Под новыми кристаллами понимаются те, которые отсутствуют в последнем издании справочника [5]. Линейные и нелинейные оптические свойства нелинейных кристаллов LiGaS_2 и LiGaSe_2 и твердых растворов $\text{LiIn}(\text{S}_x\text{S}_{1-x})_2$ и $\text{LiGa}(\text{S}_x\text{S}_{1-x})_2$ детально описаны в работах [15–18].

Условия фазового и группового синхронизмов

Традиционно в одноосных кристаллах выделяют два типа взаимодействия волн: $oo-e$ и $oe-e$ для отрицательных и $ee-o$ и $eo-o$ для положительных кристаллов. Появление высокоэффективных двуосных нелинейных кристаллов привело к пересмотру базовых понятий, используемых для описания трехчастотных взаимодействий в одноосных кристаллах [19]. Так, сами термины «обыкновенная» (o) и «необыкновенная» (e) волна теряют свой смысл и вместо них употребляют термины «медленная» ($slow-s$) и «быстрая» ($fast-f$) волны. Для произвольных трехчастотных взаимодействий надо рассматривать три типа синхронизма: $ss-f$, $sf-f$, $fs-f$; в вырожденном случае (генерация второй гармоники) остаются два типа: $ss-f$ и $sf-f$.

Кроме того, двуосные кристаллы характеризуются двумя углами синхронизма — полярным и азимутальным, вместо одного полярного для одноосных кристаллов. Особенностью преобразования частоты в фемтосекундном диапазоне длительностей является необходимость учета эффекта группового запаздывания (расстройки групповых скоростей взаимодействующих импульсов) и эффекта дисперсионного расплывания импульсов. Последним эффектом обычно пренебрегают при длительностях импульсов свыше 100 фс.

Выбирая длины взаимодействующих волн так, что $\lambda_1, \lambda_2 > \lambda_3$, при этом $\lambda_1^{-1} + \lambda_2^{-1} = \lambda_3^{-1}$, определим

Результаты моделирования

групповую (квазистатическую) длину как $L_g = \tau_p / |\Delta u_{ij}^{-1}|$, где $i, j = 1, 2, 3$; $\Delta u_{ij}^{-1} = u_i^{-1} - u_j^{-1}$ – расстройка групповых скоростей; τ_p – длительность импульса накачки. Ее увеличение пропорционально уменьшению групповой расстройки участвующих во взаимодействии импульсов.

Групповые скорости u_i и u_j вычислялись по формуле

$$u_i = \left(\frac{\partial \omega}{\partial k} \right)_{\omega=\omega_i} = c \left[n_i - \lambda_i \left(\frac{\partial n}{\partial \lambda} \right)_{\lambda=\lambda_i} \right]^{-1}$$

с использованием дисперсионных уравнений Сельмейера $n_i = n(\lambda_i)$. Значения групповой длины накладывают ограничения на длину используемых кристаллов $L < L_g$.

При невырожденном трехчастотном взаимодействии совпадения групповых скоростей чаще всего удается достичь только для пары взаимодействующих импульсов [4]. Однако уже сейчас экспериментально апробированы схемы с использованием фемтосекундного импульса накачки (λ_3) и длинного (наносекундного) затравочного импульса на холостой частоте (λ_2) с целью получения импульсов на сигнальной частоте (λ_1) с сохранением временных параметров импульса накачки [20]. В отдельных случаях удается добиться точного выполнения условий группового синхронизма в направлении фазового синхронизма, при этом $L_g \rightarrow \infty$. Поскольку условие $L_g \rightarrow \infty$ может быть реализовано только на фиксированных длинах волн, то для управления этими длинами волн разумно использовать смешанные кристаллы (твердые растворы).

Поскольку соотношение между реальными длинами кристаллов и групповой длиной является определяющим для эффективного преобразования частоты сверхкоротких импульсов, были рассчитаны групповые длины для параметрической генерации света излучением Ti:Sapphire-лазера ($\lambda_3 = 0,82$ мкм) и сигнальной волной $\lambda_1 = 4$ мкм в главных плоскостях кристаллов. Результаты расчетов приведены в таблице, здесь же указаны углы синхронизма θ и параметр $d_{эф}^2/n_1n_2n_3$, определяющий эффективность преобразования ($d_{эф}$ – коэффициент квадратичной по полю нелинейной восприимчивости; n_i – показатели преломления на длинах волн взаимодействующих излучений).

Взаимодействия в плоскости YZ не представляют практического интереса ввиду малости спектральной области, в которой достигим фазовый синхронизм, что, в свою очередь, связано с малым двулучепреломлением. Из данных таблицы следует, что для практической реализации фемтосекундных преобразователей частоты могут быть использованы кристаллы с конечными, но достаточно большими длинами, составляющими доли миллиметра.

На рис. 1 приведены рассчитанные спектральные зависимости групповой длины для генерации второй гармоники в одной из главных плоскостей кристалла $\text{LiIn}(\text{Se}_x\text{S}_{1-x})_2$, а на рис. 2 – направления одновременного выполнения условий фазового и группового синхронизмов для взаимодействий типа $ss-f$ в объеме (вне главных плоскостей) кристаллов $\text{LiIn}(\text{S}_{1-x}\text{Se}_x)_2$.

Некоторые характеристики параметрической генерации света

Кристалл	Плоскость	L_g , мм			θ , град	$d_{эф}^2/n_1n_2n_3$, (пм/В) ²		
		Δ_{31}	Δ_{32}	Δ_{21}				
$\text{LiIn}(\text{S}_{1-x}\text{Se}_x)_2$	x = 0	XY	0,10991	0,75306	0,12869	55,908	3,1569	
		XZ	0,13496	0,59894	0,17422	28,357	0,87533	
	x = 0,2	XY	0,09859	0,66315	0,1158	60,705	4,27064	
		XZ	0,1198	0,52418	0,15528	24,8415	0,92805	
	x = 0,4	XY	0,09038	0,60512	0,10625	65,475	5,40001	
		XZ	0,10899	0,47473	0,14147	21,2226	0,89139	
	x = 0,6	XY	0,08414	0,56402	0,09889	70,641	6,63014	
		XZ	0,10088	0,44002	0,1309	17,3991	0,75706	
	x = 0,8	XY	0,07926	0,53381	0,09308	76,734	8,01876	
		XZ	0,09462	0,41436	0,12262	13,0771	0,52196	
	x = 1	XY	0,07535	0,51149	0,08836	89,019	9,22371	
		XZ	0,08964	0,39461	0,11598	7,25309	0,19169	
	$\text{LiGa}(\text{S}_{1-x}\text{Se}_x)_2$	x = 0	XY	0,14934	1,20464	0,17047	51,12	2,88275
			XZ	0,18744	0,99288	0,23106	40,4195	1,4396
x = 0,2		XY	0,13418	0,95189	0,15619	51,309	3,46068	
		XZ	0,16543	0,80739	0,20806	40,5016	1,81179	
x = 0,4		XY	0,12284	0,82433	0,14436	51,93	4,04306	
		XZ	0,14966	0,70699	0,18986	40,2608	2,17564	
x = 0,6		XY	0,11403	0,74177	0,13474	52,677	4,62826	
		XZ	0,13768	0,6397	0,17544	39,915	2,53686	
x = 0,8		XY	0,10689	0,67976	0,12683	53,424	5,21634	
		XZ	0,12828	0,58863	0,16403	39,5474	2,89862	
x = 1		XY	0,10113	0,63319	0,12035	54,135	5,81039	
		XZ	0,12083	0,55029	0,15482	39,1878	3,26391	
AgGaGeS_4		–	XY	0,10548	0,71807	0,12364	55,602	3,41103
			XZ	0,12885	0,51382	0,17197	43,0636	9,63026

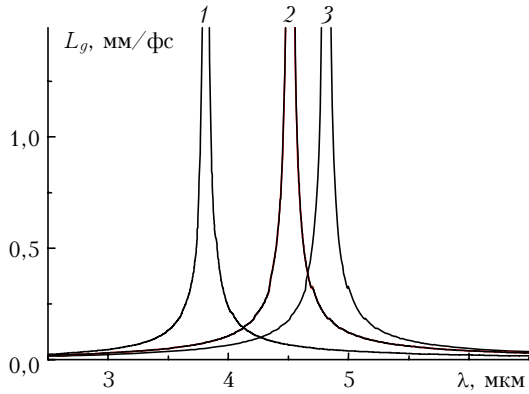


Рис. 1. Дисперсия групповых синхронизмов для генерации второй гармоники в кристалле $\text{LiIn}(\text{Se}_x\text{S}_{1-x})_2$ в плоскости XZ по типу взаимодействия $ss-f$: $x = 0$ (1); 0,5 (2); 1 (3)

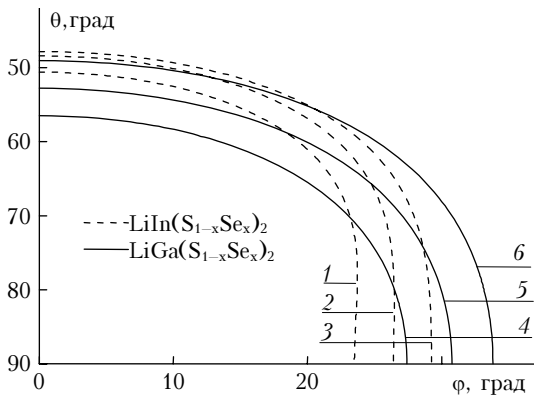


Рис. 2. Направления одновременного выполнения условий фазового и группового синхронизмов для взаимодействий типа $ss-f$ вне главных плоскостей кристаллов $\text{LiIn}(\text{S}_{1-x}\text{Se}_x)_2$: $x = 1$ (кривая 1); 0,5 (2); 0 (3) и $\text{LiGa}(\text{S}_{1-x}\text{Se}_x)_2$: $x = 1$ (кривая 4); 0,5 (5); 0 (6)

Видно, что для смешанных кристаллов с неизменным отношением смещения x одновременная реализация группового и фазового синхронизмов реализуется в направлении некоторой лоции, которая смещается при изменении отношения смещения.

Зависимости λ_1 и λ_2 от λ_3 ($\lambda_3^{-1} = \lambda_1^{-1} + \lambda_2^{-1}$), для которых в направлении фазового синхронизма выполняется условие группового синхронизма для взаимодействий типа $sf-f$ (кривые 1–3), типа $fs-f$ (4–6) в плоскости XY в кристаллах LiGaS_2 и LiGaSe_2 , представлены на рис. 3. Взаимодействие типа $ss-f$ в плоскости XY не реализуемо вследствие обращения в нуль эффективной нелинейной восприимчивости $d_{\text{эф}}$ [17]. Из вида кривых рис. 3 следует, что преобразование частоты фемтосекундных импульсов возможно в широком диапазоне длин волн.

Также в рамках стандартной трехволновой одномерной модели проводилось численное моделирование и исследовалась динамика преобразования фемтосекундных импульсов с учетом дисперсии групповых скоростей импульсов и дисперсионного расплывания импульсов.

Система исходных уравнений для амплитуд волн накачки, а также сигнальной и холостой волн, полученная в приближении плоских волн, имеет вид [5]:

$$\frac{\partial A_1}{\partial z} + \frac{1}{u_1} \frac{\partial A_1}{\partial t} + \delta_1 A_1 + i \frac{\beta_1}{2} \frac{\partial^2 A_1}{\partial t^2} = -i \sigma_1 A_3 A_2 \exp(-i \Delta k z),$$

$$\frac{\partial A_2}{\partial z} + \frac{1}{u_2} \frac{\partial A_2}{\partial t} + \delta_2 A_2 + i \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A_2}{\partial t^2} = -i \sigma_2 A_3^* A_1 \exp(-i \Delta k z),$$

$$\frac{\partial A_3}{\partial z} + \frac{1}{u_3} \frac{\partial A_3}{\partial t} + \delta_3 A_3 + i \frac{\beta_3}{2} \frac{\partial^2 A_3}{\partial t^2} = -i \sigma_3 A_3^* A_1 \exp(-i \Delta k z),$$

где $\Delta k = k_1 - k_2 - k_3$ – волновая расстройка, k_i – волновые числа волн накачки, холостой и сигнальной; β_i , δ_i , σ_i – дисперсионные параметры, коэффициенты оптических потерь и нелинейной связи соответственно. В расчетах не учитывались дифракция и снос излучения, поскольку для избежания разрушения кристаллов реальные апертуры пучков должны быть велики (порядка долей мм^2). Линейное и двухфотонное поглощения на соответствующих длинах волн также считались пренебрежимо малыми. В качестве входных параметров выбирались длительность импульса 100 фс и интенсивность 10 $\text{ГВт}/\text{см}^2$, длины кристаллов соответствовали групповым длинам. Эффективность преобразования по энергии составляла от 12 до 67% в зависимости от типа кристалла и типа рассматриваемого взаимодействия.

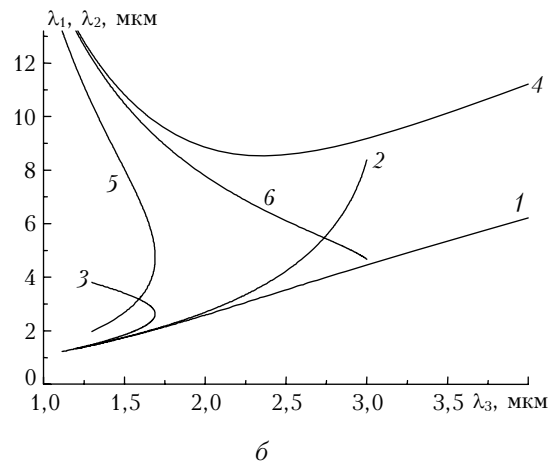
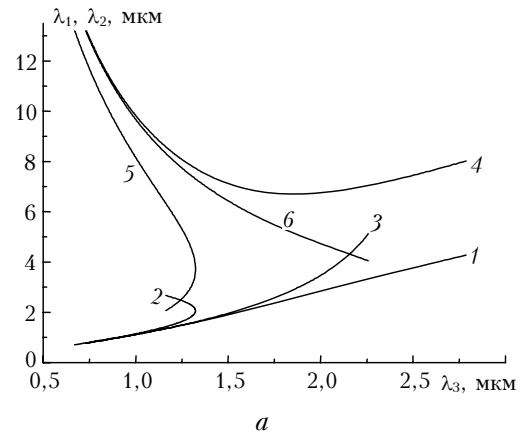


Рис. 3. Спектральная зависимость группового синхронизма волн типа s_1-f_2 (1), f_2-s_3 (2), s_1-f_3 (3), f_1-s_2 (4), s_2-f_3 (5) и f_1-f_3 (6) для типа $sf-f$ (1–3) и $fs-f$ (4–6) взаимодействия в нелинейных кристаллах LiGaS_2 (a) и LiGaSe_2 (б)

Одним из возможных режимов преобразования частоты фемтосекундных импульсов является режим, при котором разности групповых скоростей для двух пар взаимодействующих волн имеют противоположные знаки. При соответствующем выборе предварительной временной задержки между импульсами на входе кристалла, интенсивность импульсов и длины кристалла можно достичь преобразования с компрессией длительности импульсов. При этом в случае реализации режима компрессии импульсов пиковая мощность преобразованного излучения, как показывают оценки, возрастает по сравнению с накачкой за счет уменьшения длительности импульса до 10 раз.

В двусосном кристалле AgGaGeS_4 (твердом растворе кристаллов AgGaS_2 и GeS_2) также могут быть реализованы условия преобразования частоты импульсов фемтосекундной длительности. При преобразовании частоты в условиях группового синхронизма сверхкоротких импульсов (длительность $\tau < 10^{-13}$ с) становятся существенными их дисперсионные расплывания при распространении в кристалле. Для оценки степени влияния этого расплывания используются характерные параметры: длина дисперсионного расплывания

$$L_d = 0,5\tau^2 \left(\frac{\partial^2 k}{\partial \omega^2} \right)^{-1}$$

и время дисперсионного расплывания

$$\tau_d = 4L^2 \left(\frac{\partial^2 k}{\partial \omega^2} \right)^2,$$

где L — длина кристалла. Данный эффект нужно учитывать, если $L > L_d$ или $\tau_p < \tau_d$ [21]. На рис. 4 приведены спектральные зависимости дисперсионных длин для случая распространения вдоль главных осей кристалла AgGaGeS_4 импульса с длительностью $\tau_p = 100$ фс.

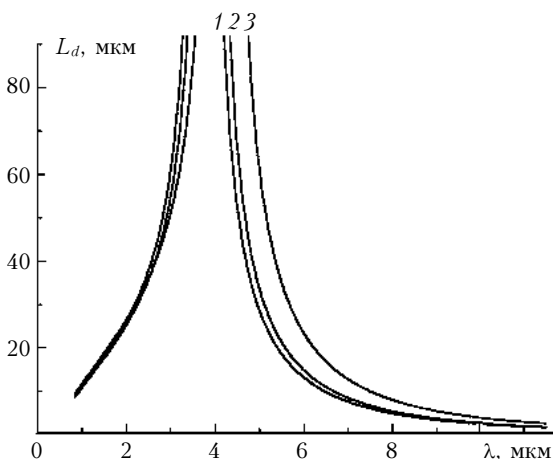


Рис. 4. Зависимости дисперсионных длин для волн, поляризованных ортогонально плоскостям YZ (1); XZ (2); XY (3)

Кроме того, для генерации второй гармоники типа $fs-f$ реализуется режим преобразования с компрессией, т.е. когда выполняется соотношение

$(u_2^f - u_1^s) = -(u_2^f - u_1^f)$ между групповыми скоростями накачки u_1 и второй гармоники u_2 . Отметим, что в кристалле AgGaGeS_4 возможна генерация второй гармоники в условиях группового синхронизма в диапазоне 4,1–4,26 мкм. Кроме того, этот кристалл может использоваться в схеме эффективной параметрической генерации фемтосекундного излучения с накачкой Cr:Forsterite -лазером в условиях попутного синхронизма между импульсами накачки и генерируемого излучения.

Заключение

Итак, проведенные оценки показывают, что исследованные двусосные кристаллы LiInS_2 , LiInSe_2 , LiGaS_2 , LiGaSe_2 , AgGaGeS_4 являются реальными кандидатами на роль преобразователей частоты излучения сверхкоротких импульсов. Для преобразования частоты фемтосекундных импульсов в двусосных кристаллах $ss-f$ -тип взаимодействия предпочтителен по сравнению с типами $fs-f$ и $sf-f$ вследствие меньшей групповой расстройки импульсов. Разумеется, при окончательном выборе типа взаимодействия следует учитывать и другие характеристики, например пространственную зависимость эффективной нелинейной восприимчивости.

Полученные данные по групповым длинам и их дисперсиям могут служить ориентиром для предварительного выбора подходящего нелинейного кристалла для конкретной схемы преобразования. Перестройка по двум углам синхронизма (θ и ϕ) в двусосных кристаллах открывает дополнительные возможности подстройки групповых синхронизмов под требуемые длины волн.

1. *Femtosecond Laser Pulses: Principles and Experiments* / Ed. C. Rulliere. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2004. 309 p.
2. Крюков П.Г. Лазеры ультракоротких импульсов // Квант. электрон. 2001. Т. 31. № 2. С. 95–119.
3. Rotermund F., Petrov V., Noack F. Optical parametric generation of femtosecond pulses up to 9 μm with LiInS_2 pumped at 800 nm // Appl. Phys. Lett. 2001. V. 78. N 18. P. 2623–2625.
4. Гордиенко В.М., Михеев П.М., Прялкин В.И. Эффективная параметрическая генерация фемтосекундного ИК-излучения с использованием свойств групповых синхронизмов // Квант. электрон. 1999. Т. 28. № 1. С. 37–42.
5. Dmitriev V.G., Gurzadyan G.G., Nikogosyan D.N. Handbook of Nonlinear Optical Crystals. New-York; Berlin: Springer-Verlag, 1999. 413 p.
6. Андреев Ю.М., Ге́йко Л.Г., Ге́йко П.П., Грецин С.Г. Оптические свойства нелинейного кристалла LiInS_2 // Квант. электрон. 2001. Т. 31. № 7. С. 647–648.
7. Fossier S., Salaün S., Mangin J., Bidault O., Thenot I., Zondy J.-J., Chen W., Rotermund F., Petrov V., Petrov P., Henningsen J., Yelissejev A., Isaenko L., Lobanov S., Balachninaite O., Slekyš G., Sirutkaitis V. Optical, vibrational, thermal, electrical, damage and phase-matching properties of lithium thioindate // J. Opt. Soc. Amer. B. 2004. V. 21. N 11. P. 1981–2007.
8. Badikov V.V., Chizhikov V.I., Efimenko V.V., Efimenko T.D., Panyutin V.L., Shevyrdyaeva G.S., Sherba-

- kov S.I.* Optical properties of lithium indium selenide // *Opt. Mater.* 2003. V. 23. N 5. P. 575–58.
9. *Isaenko L., Yeliseev A., Lobanov S., Petrov V., Roter-mund F., Slekys G., Zondy J.-J.* LiInSe₂: A biaxial ternary chalcogenide crystal for nonlinear optical applications in the midinfrared // *J. Appl. Phys.* 2002. V. 91. N 12. P. 9475–9480.
 10. *Андреев Ю.М., Бадиков В.В., Гейко П.П., Гречин С.Г., Ефименко В.В., Ефименко Т.Д., Панютин В.Л., Тухомиров А.А., Шайдук А.В.* Генерация второй гармоники ТЕА–СО₂-лазера в LiInSe₂ // *Оптика атмосф. и океана.* 2004. Т. 17. № 2–3. С. 133–139.
 11. *Petrov V., Badikov V., Shevyrdayeva G., Panyutin V., Chizhikov V.* Phase-matching properties and optical parametric amplification in single crystals of AgGaGeS₄ // *Opt. Mater.* 2004. V. 26. N 3. P. 217–331.
 12. *Andreev Yu.M., Geiko P.P., Badikov V.V., Bhar G.C., Das S., Chaudhury A.K.* Nonlinear optical properties of defect tetrahedral crystals HgGa₂S₄ and AgGaGeS₄ and mixed chalcopyrite crystal Cd_(0.4)Hg_(0.6)Ga₂S₄ // *Nonlinear Opt.* 2002. V. 29. N 1. P. 19–27.
 13. *Андреев Ю.М., Бадиков В.В., Гейко Л.Г., Гейко П.П., Гречин С.Г.* Оптические свойства нового нелинейного кристалла AgGaGeS₄ // *Прикл. физ.* 2002. № 2. С. 102–108.
 14. *Ren D.M., Huang J.Z., Qu Y.C., Hu X.Y., Andreev Y.M., Geiko P.P., Badikov V.V., Shaiduko A.V.* Optical properties and frequency conversion with AgGaGeS₄ crystal // *Chin. Phys.* 2004. V. 13. N 9. P. 1468–1473.
 15. *Petrov V., Yeliseev A., Isaenko L., Lobanov S., Tito A., Zondy J.-J.* Second harmonic generation and optical parametric amplification in the mid-IR with orthorhombic biaxial crystals LiGaS₂ and LiGaSe₂ // *Appl. Phys. B.* 2004. V. 78. N 5. P. 543–546.
 16. *Isaenko L., Vasilyeva I., Merkulov A., Yeliseyev A., Lobanov S.* Growth of new nonlinear crystals LiMX₂ (M = Al, In, Ga; X = S, Se, Te) for the mid-IR optics // *J. Cryst. Growth.* 2005. V. 275. N 1–2. P. 217–223.
 17. *Гейко П.П., Коцубинская Е.П.* Новый нелинейный кристалл LiGa(Se_xS_{1-x})₂ для преобразования частоты излучения лазеров ближнего ИК-диапазона // *Оптика атмосф. и океана.* 2006. Т. 19 (в печати).
 18. *Andreev Yu.M., Atuchin V.V., Geiko P.P., Popov V.V., Lanskii G.V., Trocenko N.C.* New mixed LiIn(S_{1-x}Se_x)₂ crystals for frequency conversion of IR lasers // XI Int. Symp. on Atmospheric and Ocean Optics / *Atmosph. Phys.* // *Proc. SPIE.* 2005. V. 5743. P. 420–427.
 19. *Гречин С.Г., Гречин С.С., Дмитриев В.Г.* Полная классификация типов взаимодействия при генерации второй гармоники в двухосных нелинейных кристаллах // *Квант. электрон.* 2000. Т. 30. № 5. С. 377–386.
 20. *Hong J., Bawagan A.D.O., Charbonneau S., Stolorow A.* Broadly tunable femtosecond pulse generation in the near and mid-infrared // *Appl. Opt.* 1997. V. 36. N 9. P. 1889–1893.
 21. *Ахманов С.А., Выслоух В.А., Чиркин С.А.* Оптика фемтосекундных лазерных импульсов М.: Наука, 1988. 310 с.

P.P. Geiko, E.P. Kotsubinskaya. **New biaxial mixed crystals for frequency conversion of femtosecond pulses.**

A numerous number of recently known (LiInS₂, LiInSe₂, LiGaS₂, LiGaSe₂, AgGaGeS₄), and new mixed LiIn(S_xSe_{1-x})₂ and LiGa(S_xSe_{1-x})₂ biaxial nonlinear crystals are investigated as potential frequency converters of femtosecond laser pulses. Main attention is paid to generation of frequency tunable near and middle IR emission by optical parametric generation under the pumping by available femtosecond Ti:Sapphire laser. The investigation includes estimation of phase- and group-velocity matching conditions and potential efficiencies.