

П.П. Гейко

Условия фазового и группового синхронизма в нелинейных кристаллах смешанного типа $\text{AgGa}(\text{Se}_{1-x}\text{S}_x)_2$

Институт оптического мониторинга СО РАН, г. Томск

Поступила в редакцию 4.06.2003 г.

Впервые установлены коэффициенты дисперсионных уравнений Сельмейера новых перспективных нелинейных кристаллов смешанного типа $\text{AgGa}(\text{Se}_{1-x}\text{S}_x)_2$ при различном отношении смешения. Рассчитаны и построены диаграммы фазового синхронизма для трехчастотных взаимодействий. Вычислена дисперсия групповых синхронизмов для случая генерации второй гармоники. Исследовано влияние соотношения смешения на реализацию условий синхронизма в конкретных схемах: параметрическая генерация света с накачкой излучением $\text{YAG}:\text{Ho}^{3+}$ ($\lambda = 2,1$ мкм) и $\text{YAG}:\text{Nd}^{3+}$ ($\lambda = 1,064$ мкм) лазеров, генерация второй гармоники CO_2 -лазера. Определен поверхностный порог разрушения кристаллов.

Введение

В настоящее время генерация перестраиваемого по частоте когерентного излучения методами нелинейного оптического смешения частот является хорошо отработанной техникой. После изобретения лазеров были открыты многочисленные нелинейные материалы для использования в различных лазерных устройствах в ультрафиолетовом (УФ), видимом и инфракрасном (ИК) спектральных диапазонах. Для лазерных систем, работающих в среднем ИК-диапазоне, сейчас доступны кристаллы ZnGeP_2 и AgGaSe_2 высокого оптического качества. Но, из-за значительного поглощения в коротковолновой области прозрачности, источники накачки для этих кристаллов должны иметь длину волны более 1,5 мкм. В настоящее время продолжаются исследования, направленные на поиск и создание подходящих нелинейных материалов, имеющих высокое оптическое качество, большую квадратичную нелинейность и высокий порог разрушения.

В работе [1] сообщалось о создании кристалла CsGeCl_3 , имеющего широкий спектр прозрачности как в инфракрасной, так и в видимой областях (0,4–20 мкм). Но этот кристалл все еще не достаточно исследован, не вышел из стен лаборатории и коммерчески недоступен. Кристалл LiInS_2 , прозрачный в области 0,4–12,5 мкм, имеет низкую нелинейность ($d_{31} = 6,2$; $d_{32} = 5,4$ и $d_{33} = 9,8$ пм/В) [2, 3]. Однако все упомянутые кристаллы в общем случае не позволяют выполнить условия не критичного фазового синхронизма для любой выбранной заранее длины волны накачки.

Для решения этой проблемы следует рассмотреть кристаллы смешанного типа, структуры халькогенидов или халькопиритов. Тройные халькогенидные кристаллы с высокой нелинейной квадратичной восприимчивостью находят применение для преобразования частоты излучения от видимого до среднего ИК-диапазона, в том числе в пико- и фем-

тосекундной лазерной технике. Ранее показано, что получение твердых растворов двух полупроводниковых кристаллов типа $\text{A}^{\text{IV}}\text{B}^{\text{VI}}\text{C}_2$ [4] или $\text{A}^{\text{IV}}\text{B}_2$ и $\text{A}^{\text{III}}\text{C}_2$ [5] является перспективным способом создания кристаллов с широкой областью прозрачности и управляемым двулучепреломлением.

Эти кристаллы также обладают не критичным фазовым синхронизмом, достигаемым выбором отношения смешения x , для заранее выбранной длины волны. Уже сообщалось о разработке различных лазерных устройств, использующих не критичный фазовый синхронизм в кристаллах $\text{CdGe}(\text{As}_x\text{P}_{1-x})_2$, $\text{AgGa}_x\text{In}_{1-x}\text{S}_2$ (средний ИК-диапазон) [4], $\text{AgGa}_x\text{In}_{1-x}\text{Se}_2$ (ближний и средний ИК-диапазоны) [6, 7].

В данной статье рассмотрены оптические свойства смешанного кристалла $\text{AgGa}(\text{Se}_{1-x}\text{S}_x)_2$ [8], являющегося твердым раствором исходных кристаллов AgGaS_2 : AgGaSe_2 .

1. Лине́йные оптические свойства

Отрицательные кристаллы AgGaS_2 , AgGaSe_2 точечной группы симметрии $\bar{4}2m$ имеют широкий диапазон прозрачности, пропускание по нулевому уровню (0,47–13 мкм) и (0,71–19 мкм) соответственно [9]. В нашем распоряжении были тонкие 2-мм пластины кристалла $\text{AgGa}(\text{Se}_{1-x}\text{S}_x)_2$, для $x = 0,2$; 0,5; и 0,75, выращенные методом Бриджмена–Стокбаргера. В результате точечного химического микроанализа, проведенного с помощью электронного спектрофотометрического микроскопа фирмы «Jeul» (Япония), установлено, что возможны 5%-е вариации состава в локальных объемах размером 1×1 мм и глубиной 50 Å.

Для определения дисперсии коэффициентов поглощения исследуемых кристаллов проводились измерения пропускания $T(\lambda)$ пластинок в неполяризованном свете в диапазоне 0,5–1,0 мкм. Аналоговый сигнал от приемного устройства спектрофотометра

преобразовывался в цифровой код и далее обрабатывался на компьютере. Так как излучение падало нормально на пластинку, то коэффициенты поглощения $\alpha(\lambda)$ определялись из экспериментальных данных $T(\lambda)$ по формуле

$$T(\lambda) = \frac{[1 - R(\lambda)]^2 \exp[-\alpha(\lambda)d]}{1 - R^2(\lambda) \exp[-2\alpha(\lambda)d]},$$

где $R(\lambda) = [n(\lambda) - 1]^2 / [n(\lambda) + 1]^2$ – коэффициент отражения излучения для границы «воздух–кристалл»; d – толщина пластинки. Результаты измерений приведены на рис. 1.

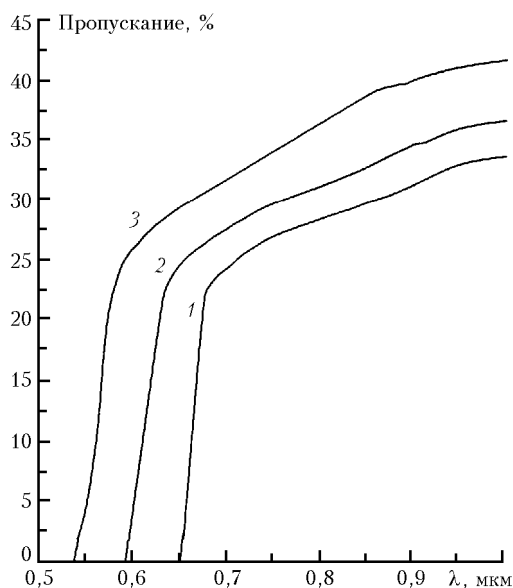


Рис. 1. Спектральная зависимость пропускания кристалла $\text{AgGa}(\text{Se}_{1-x}\text{S}_x)_2$ толщиной 2 мм для $x = 0,2$ (кривая 1); 0,5 (2); 0,75 (3)

Из рис. 1 видно, что с увеличением относительного содержания селена, как более тяжелого элемента, чем сера, коротковолновая граница прозрачности смещается в область больших длин волн. Этого и следовало ожидать, поскольку ширина запрещенной зоны практически линейно изменяется от 1,72 эВ (AgGaSe_2) до 2,59 эВ (AgGaS_2) [4]. Хотя измерения пропускания в среднем ИК-диапазоне спектра не проводились, следует ожидать, что и длинноволновая граница прозрачности, с ростом содержания селена, также должна смещаться в длинноволновую область.

Измерения главных значений показателей преломления кристаллов в средней ИК-области спектра проводились при комнатной температуре на призмах методом угла наименьшего отклонения. Погрешность измерений не превышала 10^{-3} . Дисперсионные зависимости оценивались методом взвешенного среднего [10] по формуле

$$n_{o,e}^2[\text{AgGa}(\text{Se}_{1-x}\text{S}_x)_2] = x n_{o,e}^2[\text{AgGaS}_2] + (1-x) n_{o,e}^2[\text{AgGaSe}_2].$$

Полученные данные затем подгонялись методом наименьших квадратов уравнениями Сельмейера вида

$$n_{o,e} = A_{o,e} + B_{o,e}/(1 - C_{o,e}/\lambda^2) + D_{o,e}/(1 - E_{o,e}/\lambda^2),$$

соответствующие константы приведены в таблице. Кроме того, коэффициенты Сельмейера находились методом пропорционального усреднения соответствующих коэффициентов для AgGaSe_2 и AgGaS_2 . Результаты в обоих случаях практически совпали.

2. Нелинейные оптические свойства

В тройных халькогенидах, при замене атомов серы на атомы селена или теллура, область прозрачности смещается в длинноволновую часть спектра, при этом также увеличивается нелинейная восприимчивость с увеличением массы халькогена [11, 12].

Для определения нелинейных оптических свойств смешанных кристаллов можно использовать ряд методов [10, 13]. В данной статье представлены оценки нелинейной восприимчивости второго порядка d_{ij} , выполненные с использованием модели связанных зарядов, дающей наилучшее совпадение с экспериментом для различных кристаллов, в том числе и $\text{AgGa}(\text{Se}_{1-x}\text{S}_x)_2$. Для кристаллов $\text{AgGa}(\text{Se}_{0,8}\text{S}_{0,2})_2$ определены ненулевые компоненты тензора нелинейной квадратичной восприимчивости $d_{36} = (33,5 \pm 2) \cdot 10^{-12}$ м/В с учетом уточненного значения $d_{36} = (39 \pm 2) \cdot 10^{-12}$ м/В для AgGaSe_2 . Для AgGaS_2 значение d_{36} принималось равным $(12 \pm 1) \cdot 10^{-12}$ м/В [9]. Используя эти данные как опорные, мы находили значения d_{36} для кристаллов $\text{AgGa}(\text{Se}_{1-x}\text{S}_x)_2$. Выражения для эффективного нелинейного коэффициента для исходных и смешанного кристаллов совпадают и имеют вид $d_{ef}(oo-e) = d_{36} \sin \theta \sin 2\varphi$ и $d_{ef}(eo-e) = d_{36} \sin 2\theta \cos 2\varphi$. Эффективность преобразования прямо пропорциональна коэффициенту нелинейного качества $M_{ef} = d_{ef}^2 / n^3$, рассчитанная

Коэффициенты Сельмейера для $\text{AgGa}(\text{Se}_{1-x}\text{S}_x)_2$

x	A_o	B_o	C_o	D_o	A_e	B_e	C_e	D_e	$E_{o,e}$
0,10	2,08892	0,50478	0,15396	0,23261	2,21393	0,34882	0,22881	0,24038	1000
0,20	2,077	0,49936	0,15008	0,25802	2,19861	0,34171	0,22335	0,26424	1000
0,40	2,04832	0,4832	0,1404	0,31026	2,16354	0,33132	0,20899	0,3134	1000
0,50	2,03026	0,48393	0,13427	0,33713	2,14238	0,32942	0,19935	0,33873	1000
0,60	2,00816	0,48496	0,12697	0,36454	2,117	0,33153	0,1873	0,36458	1000
0,75	1,96217	0,49901	0,11303	0,40668	2,06372	0,34947	0,16243	0,40435	1000

спектральная зависимость которого для случая ГВГ приведена на рис. 2. Интересно отметить, что для случая генерации второй гармоники по типу $eo-e$, несмотря на меньшие, чем в $AgGaSe_2$, значения нелинейного коэффициента d_{36} в смешанных кристаллах, при $x = 0,2$ и $0,4$ за счет меньших показателей преломления и оптимальных углов синхронизма, коэффициент качества может быть и выше (рис. 2, б.).

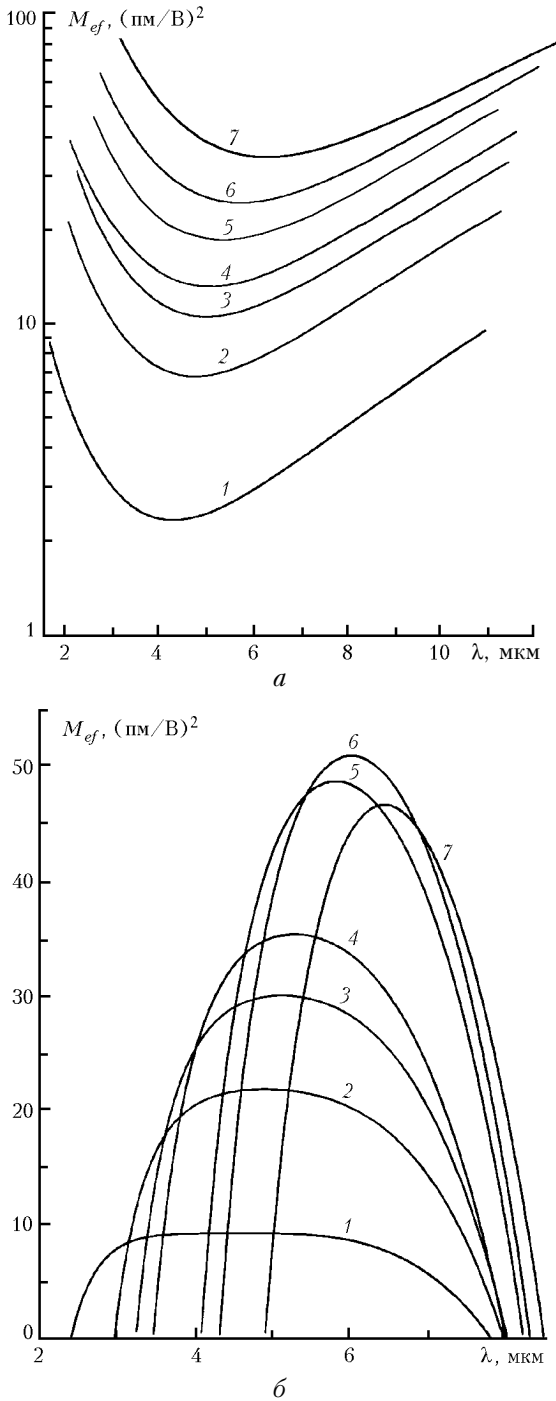


Рис. 2. Спектральная зависимость коэффициента нелинейного качества для ГВГ типа $oo-e$ (а) и типа $eo-e$ (б) в $AgGa(Se_{1-x}S_x)_2$ для $x = 1$ (кривая 1); 0,75 (2); 0,6 (3); 0,5 (4); 0,4 (5); 0,2 (6); 0,0 (7)

3. Условия фазового и группового синхронизма

Фазовое согласование в отрицательных кристаллах, взаимодействующих по I типу ($o + o \rightarrow e$) волн, достигается при одновременном выполнении следующих условий:

$$\frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2} = \frac{1}{\lambda_3},$$

$$\frac{n_1^o}{\lambda_1} + \frac{n_2^o}{\lambda_2} = \frac{n_3^e(\theta)}{\lambda_3} = \frac{n_3^o n_3^e}{\lambda_3 \sqrt{(n_3^o \sin \theta)^2 + (n_3^e \cos \theta)^2}},$$

являющихся, по сути, законами сохранения энергии и квазиимпульса. Используя измеренные и опубликованные ранее для $AgGaSe_2$ и $AgGaS_2$ показатели преломления [9], мы проанализировали возможные нелинейные трехчастотные процессы в этих кристаллах.

Диаграммы фазового синхронизма трехчастотных взаимодействий в $AgGa(Se_{0,5}S_{0,5})_2$, представляющие множество решений упомянутой выше системы уравнений, рассчитаны с использованием табулированных коэффициентов Сельмейера и представлены на рис. 3. Кривые построены для коллинеарного взаимодействия при различных углах распространения волн по отношению к оптической оси кристалла. Из рис. 3 видно, что представляющий наибольший интерес не критичный 90° -й синхронизм может быть реализован в широкой спектральной области.

Вырожденным случаем трехчастотных взаимодействий является генерация второй гармоники. На рис. 4, а показаны кривые синхронизма для ГВГ при различном содержании Se. С увеличением содержания Se уменьшается двулучепреломление смешанного кристалла и, как следствие, происходит сужение спектральной области синхронизма, сопровождаемое ростом минимального значения угла синхронизма.

Для преобразования частоты фемтосекундных импульсов ключевым параметром, определяющим эффективность, является групповая длина L_g , увеличение которой пропорционально уменьшению расстройки групповых скоростей, участвующих во взаимодействии импульсов. Групповая длина взаимодействия L_g определялась по выражению

$$L_g = \tau_p / |\Delta u^{-1}|,$$

где

$$\begin{aligned} \Delta u^{-1} &= u_1^{-1} - u_2^{-1} = \\ &= c^{-1} \left(n_1 - \lambda_1 \frac{\partial n_1}{\partial \lambda_1} - n_2 + \lambda_2 \frac{\partial n_2}{\partial \lambda_2} \right) \end{aligned}$$

— групповая расстройка; τ_p — длительность импульса; $u_{1,2}$; $n_{1,2}$ и $\lambda_{1,2}$ — групповые скорости, показатели преломления и длины волн накачки и второй гармоники [14, 15]. Результаты расчетов представлены на рис. 4, б. Несмотря на то, что $L_g \rightarrow \infty$ только на фиксированных длинах волн, для практической реализации фемтосекундных преобразователей частоты могут быть использованы кристаллы с конечными, но достаточно большими групповыми длинами.

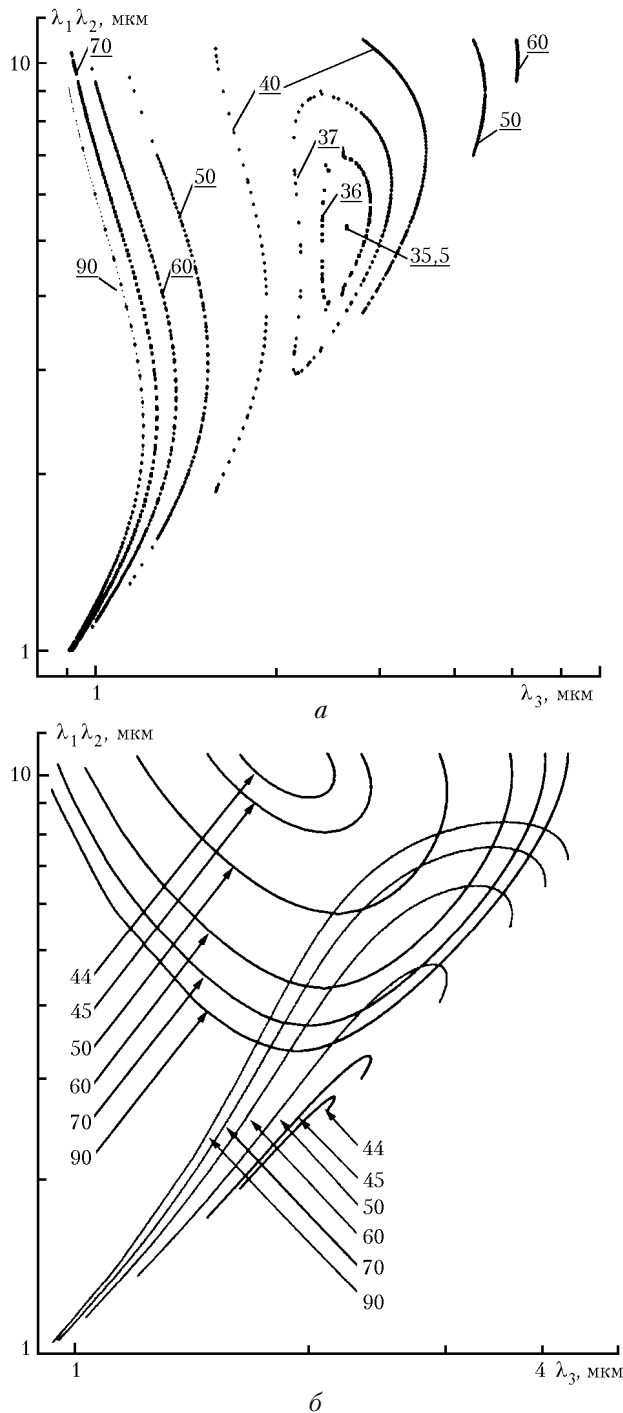


Рис. 3. Диаграммы фазового синхронизма трехчастотных взаимодействий первого ($o + o \rightarrow e$) (а) и второго ($e + o \rightarrow e$) (б) типов в кристалле $\text{AgGa}(\text{Se}_{0,5}\text{S}_{0,5})_2$ при различных углах синхронизма

В реальности никогда невозможно достичь точного фазового согласования, т.е. выполнить условие $\Delta k = 0$ для взаимодействующих волн, и поэтому необходимо знать угловую спектральную и температурную ширины синхронизма. Они позволяют оценить допустимую расходямость, спектральную ширину линии источника накачки, а также случайное или систематическое изменение температуры кри-

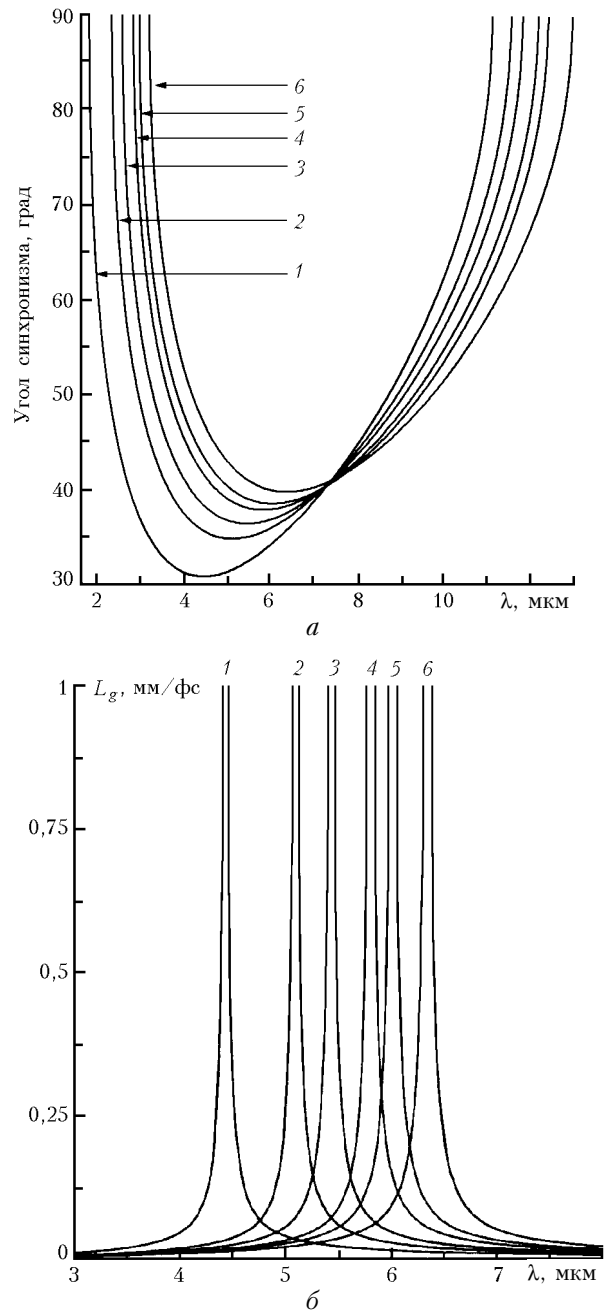


Рис. 4. Кривые фазового синхронизма (а) и дисперсия групповых синхронизмов (б) для ГВГ по I типу ($oo-e$) взаимодействия в $\text{AgGa}(\text{Se}_{1-x}\text{S}_x)_2$ при $x = 1,0$ (кривая 1); 0,6 (2); 0,4 (3); 0,2 (4); 0,1 (5); 0,0 (6)

сталла — преобразователя частоты. В линейном приближении для Δk получим

$$\Delta k = \frac{\partial(\Delta k)}{\partial(\delta\theta)} \delta\theta + \frac{\partial(\Delta k)}{\partial\lambda} \Delta\lambda + \frac{\partial(\Delta k)}{\partial T} \Delta T.$$

Уменьшение вдвое мощности преобразованного излучения происходит при волновой расстройке $\Delta k = = 0,886\pi/L$ [9], где L — длина кристалла. С учетом этого можно оценить соответствующие ширины синхронизма:

$$\Delta\theta = 1,772\pi \left\{ L \frac{\partial(\Delta k)}{\partial(\delta\theta)} \right\}^{-1}, \quad \Delta\lambda = 1,772\pi \left\{ L \frac{\partial(\Delta k)}{\partial\lambda} \right\}^{-1},$$

$$\Delta T = 1,772\pi \left\{ L \frac{\partial(\Delta k)}{\partial T} \right\}^{-1}.$$

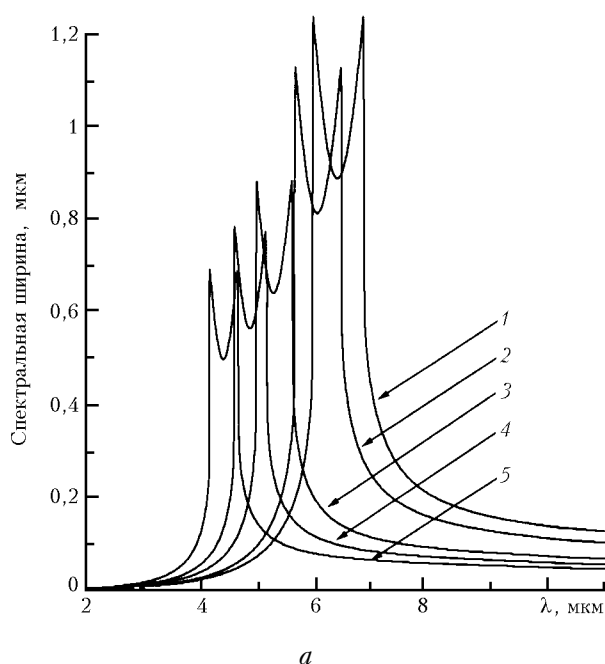
Температурные ширины не рассчитывались ввиду отсутствия данных о температурных зависимостях показателей преломления. Для генерации второй гармоники по первому типу взаимодействия в отрицательных кристаллах фазовое рассогласование Δk имеет вид

$$\Delta k = 2 \left[\frac{2\pi n_1^o}{\lambda_1} \right] - \frac{2\pi n_2^o(\theta)}{\lambda_2}.$$

Продифференцировав это выражение, предварительно подставив в него выражение для $n_2^o(\theta)$ и уравнения Сельмейера для главных значений показателей преломления, получим

$$\frac{\partial\Delta k}{\partial\theta} = \frac{2\pi}{\lambda_2} \left\{ (n_2^o(\theta))^3 \cos\theta \sin\theta \left[\frac{1}{(n_2^o)^2} - \frac{1}{(n_2^e)^2} \right] \right\},$$

$$\frac{\partial\Delta k}{\partial\lambda} = \frac{2\pi}{\lambda_2} \left\{ \frac{1}{2} \left[\frac{(n_1^o)^3}{(n_2^o)^3} \cos^2\theta \frac{\partial n_2^o}{\partial\lambda_2} + \frac{(n_1^e)^3}{(n_2^e)^3} \sin^2\theta \frac{\partial n_2^e}{\partial\lambda_2} \right] - \frac{\partial n_1^o}{\partial\lambda_1} \right\}.$$



На рис. 5 приведены результаты расчетов спектральных и угловых ширин синхронизма.

Параметрическая генерация света в кристаллах $\text{AgGa}(\text{Se}_{1-x}\text{S}_x)_2$ представляет особый интерес. Для оценки общих тенденций поведения угловых перестроечных кривых параметрической генерации мы рассчитали зависимости возбуждаемых частот (длин волн) от угла между волновым вектором накачки и оптической осью.

Наиболее подходящими для накачки ПГС в данном кристалле являются лазеры диапазона 1–2 мкм, прежде всего Nd:YAG- и Ho:ILF-лазеры. Кривые фазового синхронизма для ПГС I типа взаимодействия с накачкой излучением неодимового и гольмиевого лазеров представлены на рис. 6.

В обоих случаях с ростом концентрации Se происходит увеличение угла синхронизма, приближаясь к условиям не критичного спектрального синхронизма.

Измерения лучевой стойкости проводились по стандартной методике, описанной, например, в работе [16]. Под действием импульса ТЕА CO_2 -лазера типичной формы (длительность по полувысоте 150–200 нс и микросекундный хвост, содержащий примерно половину энергии импульса) поверхностные разрушения наблюдались при плотности мощности 40–50 МВт/см².

Отметим, что и для исходных кристаллов AgGaSe_2 и AgGaS_2 порог разрушения лежал в тех же пределах и зависел от качества предварительной обработки поверхности кристалла. Следует ожидать, что для сформированного импульса (не содержащего хвоста) длительностью около 30 нс порог разрушения поднимется до величины 150–160 МВт/см² [16].

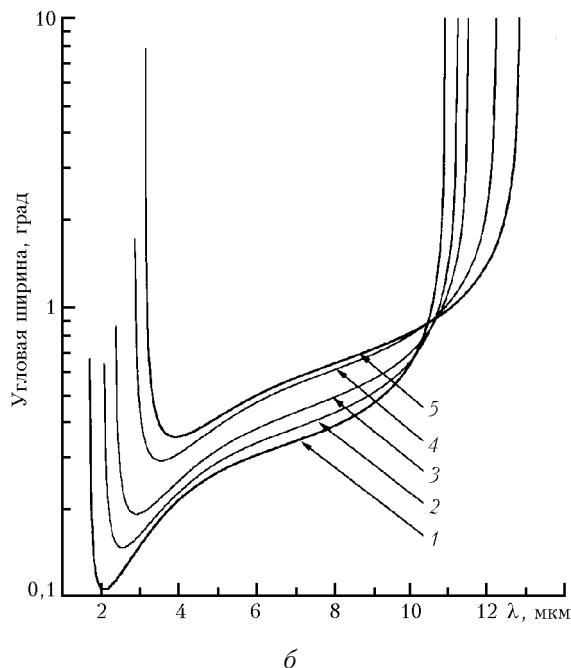


Рис. 5. Спектральные (а) и угловые (б) ширины синхронизма для генерации второй гармоники в $\text{AgGa}(\text{Se}_{1-x}\text{S}_x)_2$ для $x = 1$ (кривая 1); 0,75 (2); 0,5 (3); 0,1 (4); 0,0 (5)

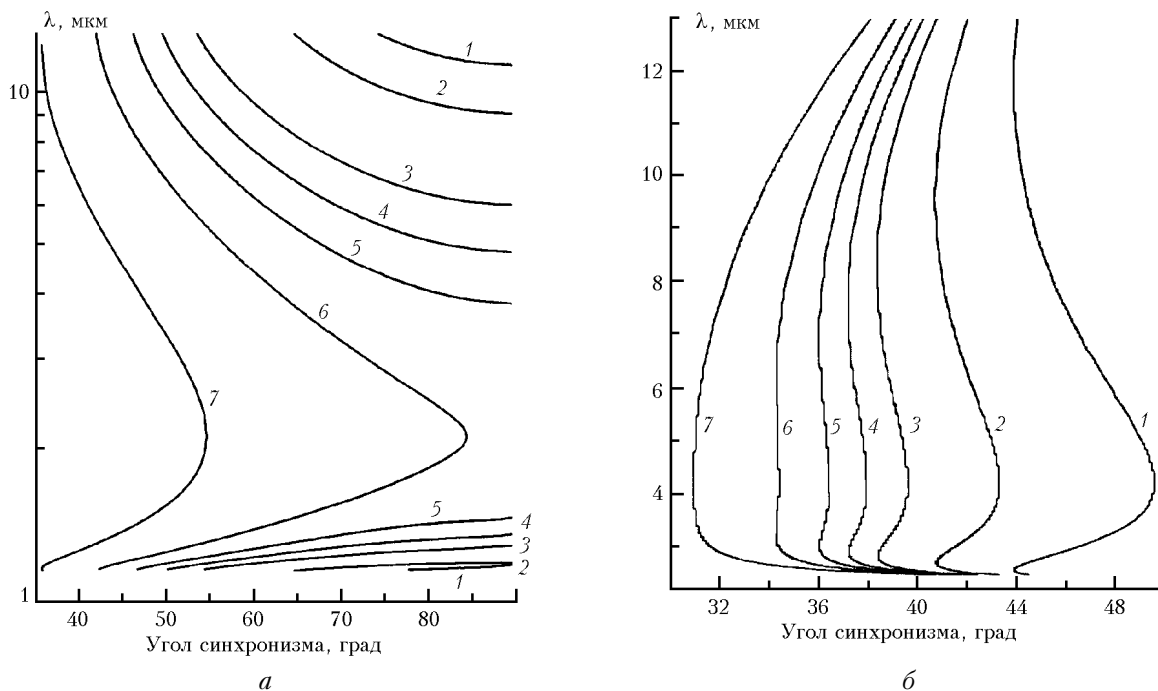


Рис. 6. Перестроенные кривые фазового синхронизма типа $(o + o \rightarrow e)$ для параметрических генераторов света с накачкой излучением Nd:YAG ($\lambda_p = 1,064$ мкм) (а) и Ho:YAG ($\lambda_p = 2,1$ мкм) (б) лазеров для $x = 0,0$ (кривая 1); 0,2 (2); 0,4 (3); 0,5 (4); 0,6 (5); 0,75 (6); 1,0 (7)

Заключение

На основании проведенных исследований и систематизации известных данных о линейных и нелинейных оптических свойствах впервые для смешанных монокристаллов $\text{AgGa}(\text{Se}_{1-x}\text{S}_x)_2$ определены коэффициенты дисперсионных уравнений Сельмейера.

Показана возможность использования этого кристалла для преобразования фемтосекундных импульсов. Установлены условия фазового синхронизма для любых трехчастотных взаимодействий, ПГС с накачкой твердотельными лазерами и ГВГ как функции процентного состава селена и серы. Возможна реализация всех рассмотренных преобразований частоты в условиях не критичного или близкого к нему синхронизма.

Таким образом, исключается влияние эффекта сноса излучения, снимается ограничение на длину используемых кристаллов и, как следствие, возрастает эффективность преобразования.

1. Tian G.-Q., Shui F.C., Wei S., Wen W.-X., Wei P.-Q. New wide-band nonlinear optics CsGeCl_3 crystal // J. Cryst. Growth. 2001. V. 225. P. 501–504.
2. Isaenko L., Vasileva I., Yelissev A., Labanov S., Malakhov V., Dovitova L., Zondy J.J., Kavun I. Growth and characterization of LiInS_2 single crystals // J. Cryst. Growth. 2000. V. 218. P. 313–322.
3. Андреев Ю.М., Гейко Л.Г., Гейко П.П., Грецин С.Г. Оптические свойства нелинейного кристалла LiInS_2 // Квант. электрон. 2001. Т. 31. № 7. С. 647–648.
4. Mikkelsen J.C., Kildal H. Phase studies, crystal growth, and optical properties of $\text{CdGe}(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$ and

$\text{AgGa}(\text{Se}_{1-x}\text{S}_x)_2$ solid solutions // J. Appl. Phys. 1978. V. 49. № 1. P. 426–431.

5. Andreev Yu.M., Geiko P.P., Badikov V.V., Bhar G.C., Das S., Chaudhury A.K. Nonlinear optical properties of defect tetrahedral crystals HgGa_2S_4 and AgGaGeS_4 and mixed chalcopyrite crystal $\text{Cd}_{(0.4)}\text{Hg}_{(0.6)}\text{Ga}_2\text{S}_4$ // Nonlinear Optics. 2002. V. 29. № 1. P. 19–27.
6. Андреев Ю.М., Батулин И.В., Гейко П.П., Гусамов А.И. Удвоение частоты CO_2 -лазеров в новом нелинейном кристалле $\text{AgGa}_x\text{In}_{1-x}\text{Se}_2$ // Квант. электрон. 1999. Т. 29. № 1. С. 66–70.
7. Гейко П.П., Гусамов А.И., Андреев Ю.М. Оптические свойства и условия фазового согласования в нелинейных кристаллах $\text{AgGa}_x\text{In}_{1-x}\text{Se}_2$ // Оптика атмосф. и океана. 1999. Т. 12. № 7. С. 606–610.
8. Cheng Gan Chao, Yang Lin, Wu Haixin, Cheng Ning. Crystal composition and optical properties of $\text{AgGa}(\text{Se}_{1-x}\text{S}_x)_2$ // Acta opt. sin. 1995. V. 15. № 3. P. 375–377.
9. Dmitriev V.G., Gruzadyan G.G., Nikogosyan D.N. Handbook of Nonlinear Optical Crystals. New-York; Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 1999. 413 p.
10. Samanta L.K., Ghosh D.K., Bhar G.C. Optical nonlinearity, band structure parametric, and refractive indices of some mixed chalcopyrite crystals // Phys. Rev. B. 1986. V. 33. N. 6. P. 4145–4148.
11. Schunemann P.G., Setzler S.D., Pollak T.M., Ohmer M.C., Goldstein J.T., Zelmon D.E. Crystal growth and properties of AgGaTe_2 // J. Cryst. Growth. 2000. V. 211. P. 242–246.
12. Ohmer M.C., Goldstein J.T., Zelmon D.E., Saxler A.W., Hegde S.M., Wolf J.D., Schunemann P.G., Pollak T.M. Infrared properties of AgGaTe_2 , a nonlinear optical chalcopyrite semiconductor // Appl. Phys. 1999. V. 86. № 1. P. 94–99.
13. Bhar G.C., Das S., Chatterjee O., Datta P.K., Andreev Yu.M. Noncritical second harmonic generation of

- CO₂ laser radiation in mixed chalcopyrite crystal // Appl. Phys. Lett. 1993. V. 63. № 10. P. 1316–1318.
14. *Ахманов С.А., Выслоух В.А., Чиркин С.А.* Оптика фемтосекундных лазерных импульсов. М.: Наука, 1988. 310 с.
15. *Лукашев А.А., Магницкий С.А., Прялкин В.И.* Дисперсия групповых синхронизмов в нелинейно-оптических преобразователях частоты сверхкоротких световых импульсов // Изв. РАН. Сер. физ. 1995. Т. 59. № 12. С. 123–129.
16. *Андреев Ю.М., Бадиков В.В., Воеводин В.Г., Гейко Л.Г., Гейко П.П., Иващенко М.В., Карпузи-ков А.И., Шерстов И.В.* Лучевая стойкость нелинейных кристаллов на длине волны 9,55 мкм // Квант. электрон. 2001. Т. 31. № 12. С. 1075–1078.

P.P. Geiko. Phase matching and group-velocity matching conditions in nonlinear mixed AgGa(Se_{1-x}S_x)₂ crystals.

The coefficients of Sellmeier's dispersion equations for the new promising nonlinear mixed crystals AgGa(Se_{1-x}S_x)₂ have been found for the first time. The phase matching diagrams for three-frequency interactions have been calculated and plotted. The dispersion of group-velocity matching for second harmonic generation has been calculated. The influence of the mixing ratio on the phase-matching conditions has been investigated for different schemes: optical parametric oscillators pumped with YAG:Ho³⁺ (λ = 2.1 μm) and YAG:Nd³⁺ (λ = 1.064 μm) lasers, CO₂ laser second harmonic generation. The surface damage threshold has been determined.