

Исследование нелинейно-оптических характеристик кристаллов $\text{AgGa}_{1-x}\text{In}_x\text{Se}_2$

В.В.Бадиков, В.Б.Лаптев, В.Л.Панютин, Е.А.Рябов, Г.С.Шевырдяева

Исследованы нелинейно-оптические характеристики кристаллов $\text{AgGa}_{1-x}\text{In}_x\text{Se}_2$ с $x = 0.25 - 0.34$. Получена экспериментальная зависимость длины волны некритичного фазового синхронизма при генерации второй гармоники с накачкой излучением CO_2 -лазера от концентрации индия. Абсолютным методом измерена квадратичная нелинейная восприимчивость. Определен порог лучевой прочности для импульсного излучения CO_2 -лазера.

Ключевые слова: нелинейно-оптические кристаллы, квадратичная нелинейная восприимчивость, лучевая прочность.

1. Введение

Перекрытие среднего ИК диапазона длин волн (3–20 мкм) перестраиваемым когерентным излучением, необходимое для решения целого ряда научных и прикладных задач, возможно при использовании процессов нелинейно-оптического преобразования излучения в кристаллах (суммарное и разностное смешение частот, параметрическая генерация света). Весьма перспективны для этих целей смешанные халькопиритные кристаллы. Кристаллы твердых растворов в первую очередь интересны тем, что их двулучепреломление является функцией состава. Это открывает широкие возможности для оптимизации кристаллов под заданный тип взаимодействия и достижения некритичного фазового синхронизма.

Кристаллы $\text{AgGa}_{1-x}\text{In}_x\text{Se}_2$ достаточно хорошо известны и перспективны их применения для реализации нелинейных трехчастотных взаимодействий с некритичным фазовым согласованием продемонстрирована в ряде работ [1–6]. Вместе с тем при выращивании кристаллов твердых растворов основная проблема состоит в получении образцов, однородных по химическому составу. У нее в принципе нет решения из-за существования в области температур кристаллизации расплава твердого раствора жидкой и твердой фаз с разными химическими составами, поэтому нелинейные элементы, вырезанные из кристаллов $\text{AgGa}_{1-x}\text{In}_x\text{Se}_2$, имеют концентрацию индия, отличную от его концентрации в шихте [6]. В связи с этим могут возникать неопределенности при расчете дисперсионных зависимостей для конкретной концентрации x , а следовательно, и при вычислении длин волн некритичного синхронизма или других характеристик. Например, в [7] была экспериментально определена за-

висимость длины волны накачки для генерации второй гармоники (ГВГ) с некритичным синхронизмом от длины волны, при которой показатели преломления n_o и n_e равны (точка изотропии). Там же проведено сравнение этой зависимости с расчетной, полученной по данным работ [4–6]. Это дало возможность утверждать, что предположение о линейной зависимости коэффициентов уравнения Селлмейера от x [6] позволяет более точно рассчитывать параметры некритичной ГВГ, чем это можно сделать по результатам работы [4]. Принципиально неустранимая неоднородность химического состава влияет также и на реальную эффективность нелинейного преобразования.

В настоящей работе были исследованы кристаллы $\text{AgGa}_{1-x}\text{In}_x\text{Se}_2$ с $x = 0.25 - 0.34$, выращенные по методу Бриджмена–Стокбаргера. Найдена связь между химическим составом кристаллов и длиной волны излучения накачки, при которой реализуется ГВГ с некритичным фазовым согласованием. Кроме того, абсолютным методом по полученной эффективности ГВГ определена компонента тензора квадратичной нелинейной восприимчивости d_{36} и измерен порог лазерного разрушения для поверхности нелинейного элемента.

2. Эксперимент

Подробное описание установки и процедуры измерений приведено в работе [8]. Большое внимание было уделено получению лазерного излучения с четко определенными и контролируемыми пространственно-временными характеристиками. В резонаторе ТЕА CO_2 -лазера устанавливалась диафрагма диаметром 10 мм, что обеспечивало получение гауссова профиля распределения интенсивности по поперечному сечению пучка накачки. Излучение было поляризовано в вертикальной плоскости. При генерации на крайних линиях с использованием смеси с малым содержанием азота и при наличии в резонаторе диафрагмы импульс излучения CO_2 -лазера состоял только из переднего пика с длительностью на полувысоте ~ 70 нс. Излучение фокусировалось линзой с фокусным расстоянием 90 см. Испытываемые кристаллы длиной от 14 до 20 мм располагались на оптическом поворотном столике в каустике линзы. Протяженность

В.В.Бадиков, В.Л.Панютин, Г.С.Шевырдяева. Кубанский государственный университет, Лаборатория новейших технологий, Россия, 350058 Краснодар, ул. Ставропольская, 149; тел./факс: (8612)-758-549, e-mail: ntlab@mail.kubsu.ru

В.Б.Лаптев, Е.А.Рябов. Институт спектроскопии РАН, Россия, 42190 Троицк, Московская обл.; тел.: (095)-334-02-31, факс: (095)-334-08-86, e-mail: ryabov@isan.troitsk.ru, laptev@isan.troitsk.ru

Поступила в редакцию 19 мая 2004 г., после доработки – 15 декабря 2004 г.

каустики составляла ~ 5 см, характерный диаметр пучка – примерно 1 мм. Таким образом, на длине кристалла плотность энергии была практически постоянной, что позволило в дальнейших расчетах использовать приближение плоских волн.

2.1. Перестроечные характеристики и пространственная однородность кристаллов $\text{AgGa}_{1-x}\text{In}_x\text{Se}_2$

Для экспериментов была выращена буля кристалла $\text{AgGa}_{1-x}\text{In}_x\text{Se}_2$ в форме цилиндра диаметром 25 мм и длиной 70 мм. Оптическая ось совпадала с осью цилиндра. Концентрация индия x монотонно изменялась по длине кристалла. Буле придала форму элемента с параллельными гранями, расположенными вдоль образующей цилиндра. Нормаль к входной грани была ориентирована так, что угол среза $\theta = 90^\circ$, а азимутальный угол $\varphi = 45^\circ$. Входная грань и оптическая ось располагались перпендикулярно направлению излучения CO_2 -лазера.

При фиксированной длине волны излучения CO_2 -лазера проводилось сканирование лазерным пучком апертуры элемента вдоль входной грани и определялись координаты участка, где регистрировалась ГВГ. В дальнейшем эти координаты использовались для изготовления элементов и взятия проб для химического анализа. Элементный состав образцов исследовался методом оптической эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой. Стехиометрический состав рассчитывался по данным трех измерений концентраций элементов.

Полученные результаты представлены на рис.1, где изображена зависимость длины волны накачки, при которой реализуется ГВГ с 90-градусным синхронизмом, от концентрации индия x в кристалле. Там же приведены результаты расчета, взятые из работ [3, 4, 6, 9]. Результаты расчетов из [3] и [4] (кривые 1 и 2) практически совпадают, поскольку авторы обеих работ предполагали, что квадраты показателей преломления n_o^2 и n_e^2 линейно связаны с концентрацией индия. Однако расчетные кривые заметно сдвинуты в область высоких концентраций по сравнению с экспериментальными значениями. Существенно ближе к эксперименту кривая 3 из работы [6], где коэффициенты уравнения Селлмейера и концентрация x были связаны линейной зависимостью. Наиболее близка

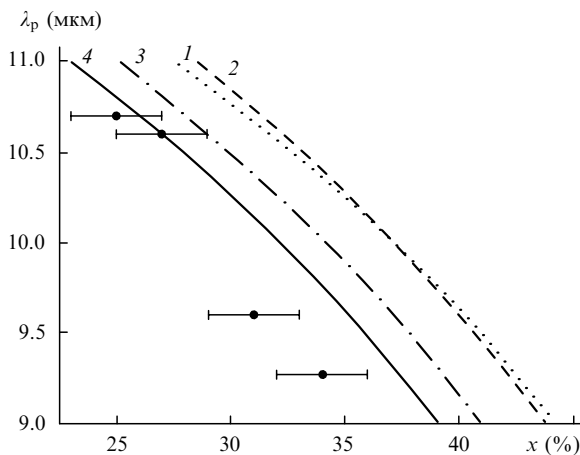


Рис.1. Зависимости длины волны накачки CO_2 -лазера λ_p , при которой реализуется ГВГ с не критичным фазовым синхронизмом, от концентрации индия x в кристалле. Точки – эксперимент, кривые – результаты расчета, взятые из работ [3] (1), [4] (2), [6] (3) и [9] (4).

к экспериментальным значениям кривая 4 из [9]. К сожалению, в [9] не приводятся исходные данные, которые легли в основу расчета теоретической зависимости.

В дальнейших экспериментах использовался образец меньших размеров (длина 14.6 мм, ширина 21.8 мм, высота 17 мм) с составом $\text{AgGa}_{0.75}\text{In}_{0.25}\text{Se}_2$. Для него можно было ожидать реализации не критичной ГВГ на длине волны накачки $\lambda_p = 10.7$ мкм. Нормаль к входной апертуре кристалла (21.8×17 мм) была ориентирована так же, как и для образца с переменным x ($\theta = 90^\circ$ и $\varphi = 45^\circ$). Входная грань располагалась перпендикулярно направлению излучения CO_2 -лазера, а оптическая ось лежала в горизонтальной плоскости. Проводилось измерение энергии излучения второй гармоники (ВГ) при сканировании апертуры элемента пучком CO_2 -лазера вдоль горизонтальной и вертикальной осей. При сканировании по горизонтали оказалось, что 90-градусный синхронизм реализуется только для средней части кристалла (рис.2). Из рис.2 видно, что ГВГ с не критичным синхронизмом происходит практически с постоянной эффективностью на ширине кристалла ~ 8 мм. Это свидетельствует о высокой однородности химического состава на данном участке. На «плато» зависимости энергии ВГ от положения лазерного пучка на расстоянии 10 мм от левого края кристалла наблюдается минимум с полушириной ~ 1 мм, где эффективность снижается примерно на одну треть. По-видимому, это связано с локальной неоднородностью внутри кристалла. При сканировании пучком CO_2 -лазера вдоль вертикали апертуры на длине 8 мм имеет место плавное изменение эффективности ГВГ с максимальным перепадом не более $\sim 30\%$.

Проведенное двумерное сканирование апертуры элемента наглядно иллюстрирует сложность получения химически однородных по составу кристаллов твердых растворов. Тем не менее достигнутую однородность можно считать достаточно высокой, поскольку при изменении концентрации индия всего на 1% частота 90-градусного синхронизма для ГВГ изменяется на $\sim 10 \text{ см}^{-1}$ (см. рис.1). Например, в наших экспериментах при смещении частоты накачки на 12.8 см^{-1} (линия 10P(16)) 90-градусный синхронизм не был достигнут ни в одной точке апертуры кристалла. Поскольку на линии 10P(16) внешний угол падения излучения накачки, при котором достигался мак-

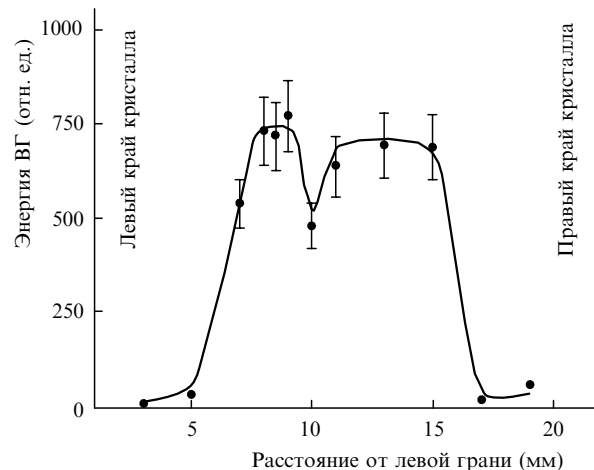


Рис.2. Зависимость энергии ВГ от положения лазерного пучка вдоль горизонтали апертуры кристалла $\text{AgGa}_{0.75}\text{In}_{0.25}\text{Se}_2$ при нормальном падении излучения на входную грань. Пучок расположен на высоте 9 мм. Длина волны накачки $\lambda_p = 10.7$ мкм.

симум ГВГ, составлял $10^\circ - 30^\circ$ для разных точек на ширине апертуры, а полуширина угловой зависимости – $10^\circ - 7^\circ$, можно сделать вывод о значительном отклонении экспериментальных условий от условий не критичного синхронизма. Таким образом, для исследованного образца кристалла $\text{AgGa}_{0.75}\text{In}_{0.25}\text{Se}_2$ изменение концентрации индия в объеме $\sim 14 \times 8 \times 8$ мм, по-видимому, составляет порядка 0.1 %.

Зависимость эффективности ГВГ от угла поворота кристалла была получена, когда излучение CO_2 -лазера с той же длиной волны $\lambda_p = 10.7$ мкм направлялось в середину апертуры кристалла. Угловая ширина синхронизма для внешнего угла на полувысоте составила 24° . Это хорошо совпадает с оценкой полуширины для 90-градусного синхронизма, проведенной по соответствующей формуле из [10]. Значения n_o и n_e , необходимые для оценки, рассчитывались по уравнениям Селлмейера с коэффициентами, взятыми из работы [3]. Полученный результат ярко демонстрирует возможность реализации в кристаллах $\text{AgGa}_{1-x}\text{In}_x\text{Se}_2$ не критичного процесса ГВГ с большой угловой шириной фазового согласования. Для сравнения, угловая ширина синхронизма при ГВГ в кристалле AgGaSe_2 той же длины на порядок меньше.

2.2. Квадратичная нелинейная восприимчивость

Измерение квадратичной нелинейной восприимчивости образца кристалла $\text{AgGa}_{0.75}\text{In}_{0.25}\text{Se}_2$ (см. п. 2.1) проводилось абсолютным методом при использовании ГВГ излучения CO_2 -лазера. Для вычисления нелинейной восприимчивости по измеренной эффективности ГВГ необходимо соблюдать определенные условия эксперимента и выбрать соответствующие ему модель нелинейного взаимодействия и способ расчета. Только так можно достигнуть необходимой степени точности получаемых результатов. Естественно, самую высокую точность вычисления можно обеспечить, решая численным методом систему уравнений для амплитуд взаимодействующих волн с полным учетом различных экспериментальных факторов, как, например, это предлагается в [11]. С другой стороны, если точность определения первичных экспериментальных данных и/или отличие реальных параметров нелинейной среды от идеальных не соответствует точности модели, то можно использовать более простые способы расчета, как это сделано в нашей работе [8] при вычислении квадратичной нелинейной восприимчивости кристаллов HgGa_2S_4 .

Для расчета компоненты тензора квадратичной нелинейной восприимчивости d_{36} предполагалось, что смешанный кристалл относится к той же точечной группе симметрии D_{2d} , что и чистые кристаллы AgGaSe_2 и AgInSe_2 . В связи с этим в случае ГВГ эффективная нелинейная восприимчивость $d_{\text{eff}} = d_{36} \sin \theta \sin 2\varphi$, и при $\theta = 90^\circ$ и $\varphi = 45^\circ$ получаем $d_{\text{eff}} = d_{36}$.

Математическое выражение для вычисления d_{eff} было получено при решении системы укороченных уравнений для связанных плоских волн в приближении заданного поля. В уравнениях учитывалось линейное поглощение полей накачки и ВГ в кристалле. При выводе окончательной формулы для d_{eff} были приняты во внимание следующие экспериментальные факторы: пучки накачки и излучения ВГ имеют гауссов профиль; различие пространственных и временных распределений излучения ВГ и CO_2 -лазера; уменьшение энергии падающей под углом фазового синхронизма волны накачки на поверхности

кристалла из-за френелевских потерь. Учитывались также реальная форма импульса CO_2 -лазера, увеличение сечения, длины прохождения и поглощения пучков излучения CO_2 -лазера и ВГ из-за их неперпендикулярного падения на входную грань, потери излучения ВГ на LiF-фильтре и френелевские потери на выходной поверхности. Пренебрегалось сносом излучения ВГ по отношению к пучку накачки и не учитывалось наличие продольных мод в излучении накачки. Таким образом, с учетом всех перечисленных факторов было получено следующее выражение для d_{eff} :

$$d_{\text{eff}} = \left\{ \frac{n_1^2 n_2 \lambda^2 c (2S \cos r / \cos i) \Delta t}{512 \pi^2 k_f (1 - R_2^p) (1 - R_1^s)^2} \times \frac{\left[\sum_i (f_i / \sum_i f_i)^2 \right]^{-1} E_2}{(e^{-2k_1 L'} - e^{-k_2 L'})^2 / (k_2 - 2k_1)^2 E_1^2} \right\}^{1/2}. \quad (1)$$

В этом выражении $n_{1,2}$ – показатели преломления кристалла для волн накачки (о-волна) и ВГ (е-волна); λ – длина волны накачки; c – скорость света; S – площадь пучка накачки в поперечном сечении на уровне $1/e$; 2 – множитель, который учитывает для гауссова пучка накачки уменьшение площади пучка ВГ в два раза по сравнению с S ; i и r – угол падения на кристалл и соответствующий ему угол преломления излучения накачки, при которых наблюдается максимум энергии импульса ВГ; $k_{1,2}$ – коэффициенты линейного поглощения в кристалле на длинах волн накачки и ВГ; k_f – коэффициент пропускания фильтра из LiF для волны ВГ; $E_{1,2}$ – измеренные в эксперименте энергии накачки и излучения ВГ в максимуме угловой зависимости интенсивности генерации; $L' = L / \cos r$; L – длина кристалла; R_1^s и R_2^p – коэффициенты отражения для волн накачки (s-поляризация) и ВГ (p-поляризация), рассчитанные по формулам Френеля с учетом наклонного падения излучения накачки на кристалл; $\Delta t = t_{i+1} - t_i$ – шаг оцифровки временной формы импульса накачки; f_i – значения функции $f(t)$, описывающей временную зависимость энергии в импульсе накачки в точках t_i .

Реальная форма лазерного импульса учитывалась аналогично тому, как это сделано в [10]. В случае ГВГ можно строго показать, что это достигается введением фактора точного учета временной формы

$$F \equiv \Delta t \left[\sum_i (f_i / \sum_i f_i)^2 \right]^{-1},$$

который рассчитывается численно. Член $(e^{-2k_1 L'} - e^{-k_2 L'}) \times (k_2 - 2k_1)^{-1}$ учитывает линейное поглощение пучков накачки и излучения ВГ и аналогичен полученному в работе [12]. В нашем случае он практически равен L' , поскольку поглощением в кристаллах $\text{AgGa}_{1-x}\text{In}_x\text{Se}_2$ можно пренебречь [9].

В результате измерений в разных точках центральной части апертуры среднее значение d_{36} для кристалла $\text{AgGa}_{0.75}\text{In}_{0.25}\text{Se}_2$ составило $(29 \pm 5) \times 10^{-12}$ м/В или $(70 \pm 12) \times 10^{-9}$ ед. СГСЭ. С учетом изменения эффективности ГВГ по вертикали апертуры кристалла d_{36} достигает $(37 \pm 5) \times 10^{-12}$ м/В или $(88 \pm 14) \times 10^{-9}$ ед. СГСЭ.

Сравним полученное значение d_{36} с имеющимися в литературе данными. В [2] были проведены относительные измерения эффективности конверсии при ГВГ в кристал-

лах $\text{AgGa}_{0.6}\text{In}_{0.4}\text{Se}_2$ и AgGaSe_2 . При этом сообщалось, что эффективность ГВГ в кристалле $\text{AgGa}_{0.6}\text{In}_{0.4}\text{Se}_2$ в 1.5 раза больше. Однако в [2] этот результат был объяснен нарушением условий синхронизма для кристалла AgGaSe_2 из-за угловой расстройки и диафрагменного апертурного эффекта вследствие высокой расходимости пучка накачки. В работе [3] по данным [13] определено отношение компонент нелинейных восприимчивостей чистых кристаллов $d_{36}(\text{AgInSe}_2)/d_{36}(\text{AgGaSe}_2) = 1.133 \pm 0.16$ и с учетом известной величины $d_{36}(\text{AgGaSe}_2) = 39.0 \times 10^{-12}$ м/В [14] рассчитаны d_{36} для смешанных кристаллов с разными x . В [3] для $x = 0.25$ величина $d_{36} = 40.3 \times 10^{-12}$ м/В. В [9] для d_{36} приводится значение 34.2×10^{-12} м/В без указания концентрации индия. Таким образом, измеренное в нашей работе максимальное значение $d_{36} = (37 \pm 5) \times 10^{-12}$ м/В в пределах погрешности хорошо соответствует значениям d_{36} , приведенным в [3] и [9].

Вместе с тем, учитывая погрешность при определении отношения $d_{36}(\text{AgInSe}_2)/d_{36}(\text{AgGaSe}_2)$ и значительный разброс известных из литературы значений $d_{36}(\text{AgGaSe}_2)$ ($(32.4 - 57.7) \times 10^{-12}$ м/В [15]), с определенностью можно лишь сказать, что компоненты d_{36} для реальных смешанных кристаллов могут быть сравнимыми с d_{36} для AgGaSe_2 . Именно это и подтвердили наши измерения.

2.3. Лучевая прочность

Для измерений лучевой прочности использовался образец $\text{AgGa}_{0.75}\text{In}_{0.25}\text{Se}_2$, описанный выше. Для сравнения одновременно проводились эксперименты по измерению порога повреждения и у кристалла AgGaSe_2 . Оба кристалла были выращены в Лаборатории новейших технологий Кубанского государственного университета и отполированы механическим способом в одной и той же оптической мастерской. Класс чистоты обработки поверхности – между III и IV. Поверхность кристаллов выступали перпендикулярно падающему излучению CO_2 -лазера, который работал на линии $10\text{P}(30)$ ($\lambda_p = 10.7$ мкм). Плотность энергии лазерного пучка Φ могла меняться от 1 до 5 Дж/см² с помощью набора ослабителей – пластинок из CaF_2 различной толщины. Площадь сечения лазерного пучка на уровне $1/e$ составляла 0.83 мм². Поскольку пространственное распределение энергии в сечении лазерного пучка было гауссовым, то приводимые далее пороги повреждения по плотности энергии реализовались в максимуме гауссова распределения.

Возникновение повреждений на поверхности образца определялось визуально: по плазменной вспышке у поверхности образца и с помощью десятикратной лупы. В эксперименте проводилось однократное облучение каждой области с последующим изменением места падения излучения. При одной и той же плотности энергии излучения облучению подвергались 8–10 разных точек поверхности кристалла. Вероятность повреждения P_d рассчитывалась как отношение числа облученных точек, в которых возникали повреждения, к общему числу точек. Порог повреждения Φ_d определялся путем построения кривой $P_d(\Phi)$ и нахождения участка, на котором $P_d > 0.5$.

Эксперимент показал, что порог повреждения $\Phi_d = 2.6 \pm 0.3$ Дж/см² для кристалла $\text{AgGa}_{0.75}\text{In}_{0.25}\text{Se}_2$ в 1.6 раза ниже, чем у кристалла AgGaSe_2 , для которого $\Phi_d = 4.2 \pm 0.5$ Дж/см². Поскольку вся энергия лазерного импульса была сосредоточена в пике импульса с длительностью на полувывсоте ~ 70 нс, то, зная Φ_d , можно вычи-

слить порог повреждения по интенсивности излучения I_d . Для $\text{AgGa}_{0.75}\text{In}_{0.25}\text{Se}_2$ он составил 37 ± 4 МВт/см², а для $\text{AgGaSe}_2 - 60 \pm 7$ МВт/см².

Обсудим подробнее полученные значения порогов повреждения I_d . Известно, что порог существенно зависит от качества образцов (концентрации поглощающих включений и дефектов), состояния их поверхности, определяемого способом обработки и хранения, и может в несколько раз различаться от образца к образцу [16]. Кроме того, порог зависит еще и от режима облучения: длительности импульса, модового состава и сечения лазерного пучка [17]. С учетом этого измеренный в настоящей работе для AgGaSe_2 порог повреждения $I_d = 60$ МВт/см² хорошо согласуется с порогами, приведенными в [18] для лазерного излучения с длинами волн 9.27–10.6 мкм и длительностью импульсов 30–150 нс. По данным работы [18] пороги лежат в диапазоне 10–150 МВт/см², однако большинство из них находятся в пределах 10–50 МВт/см².

Важно подчеркнуть, что в настоящей работе измерения лучевой прочности проводились в одних и тех же экспериментальных условиях с кристаллами, выращенными и отполированными с одинаковым качеством. Поэтому снижение в 1.6 раза порога повреждения кристаллов $\text{AgGa}_{1-x}\text{In}_x\text{Se}_2$ по сравнению с кристаллами AgGaSe_2 можно считать установленным экспериментальным фактом. На снижение для излучения ТЕА CO_2 -лазера лучевой прочности смешанных кристаллов на $\sim 20\%$ по сравнению с чистым селеногаллатом серебра указывалось в работе [3].

Необходимо также отметить, что абсолютные величины измерены для одномодового лазерного пучка с площадью пятна 0.83 мм² при однократном облучении поверхности. При увеличении площади пучка, использовании многомодового излучения и многократном облучении одного и того же участка поверхности пороги повреждения могут существенно снижаться [17, 19].

3. Заключение

В настоящей работе исследован ряд нелинейно-оптических характеристик кристаллов твердых растворов $\text{AgGa}_{1-x}\text{In}_x\text{Se}_2$ при $x = 0.25 - 0.34$. Измерена зависимость длины волны накачки, при которой реализуется ГВГ с 90-градусным синхронизмом, от концентрации индия x . Абсолютным методом определена квадратичная нелинейная восприимчивость, максимальное значение которой для конкретного образца составило $(37 \pm 5) \times 10^{-12}$ м/В. Порог поверхностного повреждения для импульсного излучения CO_2 -лазера оказался равным 37 ± 4 МВт/см².

В данной работе показано, что по своим нелинейно-оптическим характеристикам кристаллы твердых растворов $\text{AgGa}_{1-x}\text{In}_x\text{Se}_2$ находятся на уровне таких эффективных нелинейных преобразователей частоты среднего ИК диапазона, как кристаллы AgGaSe_2 . В то же время кристаллы $\text{AgGa}_{1-x}\text{In}_x\text{Se}_2$ имеют существенное преимущество: в них возможна реализация 90-градусного синхронизма для конкретного типа взаимодействия путем подбора концентрации индия.

1. Bhar G.C., Das S., Chatterjee U., Datta P.K., Andreev Yu.M. *Appl. Phys. Lett.*, **63**, 1316 (1993).
2. Bhar G.C., Das S., Satyanarayan D.V., Datta P.K., Nundy U.,

- Andreev Yu.M. *Opt. Lett.*, **20**, 2057 (1995).
3. Андреев Ю.М., Батурич И.С., Гейко П.П., Гусамов А.И. *Квантовая электроника*, **29**, 66 (1999).
 4. Takaoka E., Kato K. *Opt. Lett.*, **24**, 902 (1999).
 5. Kato K., Takaoka E., Umemura N., Chonan T. *Proc. Conf. on Lasers and Electro-Optics* (San Francisco, USA, 2000, paper CTuA9).
 6. Schunemann P.O., Setzler S.D., Pollak T.M. *J. Cryst. Growth*, **211**, 257 (2000).
 7. Badikov V.V., Chizhikov V.I., Laptev V.B., Panyutin V.L., Shevyrdyaeva G.S., Scherbakov S.I. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4972**, 139 (2003).
 8. Бадиков В.В., Кузьмин Н.В., Малиновский А.Л., Лаптев В.Б., Митин К.В., Назаров Г.С., Рябов Е.А., Серегин А.М., Щebetова Н.И. *Квантовая электроника*, **34**, 451 (2004).
 9. Catella G.C., Burlage D. *MRS Bull.*, **23**, 28 (1998).
 10. Гурзадян Г.Г., Дмитриев В.Г., Никогосян Д.Н. *Нелинейно-оптические кристаллы. Свойства и применение в квантовой электронике. Справочник* (М.: Радио и связь, 1991, с. 26).
 11. Дмитриев В.Г., Гречин С.Г., Шарандин Е.А. *Квантовая электроника*, **23** (2), 3-я стр. обл. (1996).
 12. Almqvist G., Yariv A. *Opt. Lett.*, **19**, 1828 (1994).
 13. Boyd G.D., Kasper H.M., McFee J.H., Storz F.G. *IEEE J. Quantum Electron.*, **8**, 900 (1972).
 14. Schunemann P.G., Zweiback I., Pollak T.M. *Proc. XI Int. Conf. on Ternary and Multinary Compounds* (Salford, UK, 1997).
 15. Eckardt R.C., Fan Y.X., Byer R.L., Rout R.K., Figelson R.S., van der Laan J. *Appl. Phys. Lett.*, **47**, 786 (1985).
 16. Ковалев В.И. *Труды ФИАН*, **136**, 51 (1982).
 17. Горшков Б.Г., Данилейко Ю.К., Маненков А.А., Прохоров А.М., Сидорин А.В. *Квантовая электроника*, **8**, 148 (1981).
 18. Nikogosyan D.N. *Nonlinear Optical Crystals: A Complete Survey* (New York: Springer, 2004, ch. IV-2).
 19. Маненков А.А., Нечитайло В.С. *Изв. АН СССР. Сер. физич.*, **54**, 2356 (1990).