

УПРАВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРАМИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Эффективность преобразования фемтосекундных импульсов иттербиевого волоконного лазера в средний ИК диапазон в кристаллах AgGaS_2 , BaGa_4Se_7 и HgGa_2S_4

И.О.Киняевский, Н.А.Смирнов, А.В.Корибут, М.В.Ионин,
С.И.Кудряшов, Д.В.Бадиков, Г.К.Сафаралиев

Исследована эффективность кристаллов AgGaS_2 , BaGa_4Se_7 и HgGa_2S_4 в генераторе разностной частоты среднего ИК диапазона на основе фемтосекундного иттербиевого волоконного лазера с длиной волны 1.03 мкм, длительностью импульса 0.25 пс, частотой следования импульсов 10 кГц, средней мощностью излучения 5 Вт. Показано, что в заданных экспериментальных условиях наибольшая эффективность генерации разностной частоты (до ~7.5 %) достигается с кристаллом HgGa_2S_4 , который обеспечивает в 2-3 раза большую энергию импульсов с длиной волны 4–7 мкм (до 6 мкДж) без его повреждения. Также с этим кристаллом получена наибольшая длина волны преобразованного излучения – 11 мкм с энергией импульса ~1 мкДж.

Ключевые слова: фемтосекундный импульс, генерация разностных частот, средний ИК диапазон, нелинейный кристалл.

1. Введение

Фемтосекундные лазерные источники, действующие в среднем ИК диапазоне, являются привлекательным инструментом для множества применений: ускорение частиц и генерация высоких гармоник [1], микромодификация объема полупроводников [2], инактивация патогенных бактерий [3] и др. Среди существующих видов лазерных источников среднего ИК диапазона (см., напр., обзор [4]) только некоторые из них могут излучать импульсы фемтосекундной длительности. В их числе можно отметить лазеры на ионах переходных металлов в халькогенидах [5], однако диапазон перестройки их спектра существенно ограничен шириной контура усиления.

На сегодняшний день наиболее распространенными являются фемтосекундные системы среднего ИК диапазона, построенные на нелинейно-оптическом преобразовании частоты излучения коротковолновых лазеров в нелинейных кристаллах [6–10]. Они могут обеспечить перестройку длины волны излучения практически во всем среднем ИК диапазоне [6]. Такие лазерные системы активно продолжают исследоваться и развиваться, и, более того, на данный момент они стали коммерчески доступны. Зачастую коммерческие преобразователи частоты (генераторы разностной частоты (ГРЧ)) базируются на кристалле AgGaS_2 , недостатками которого являются невысокий нелинейный коэффициент и деградация поверх-

ности при эксплуатации на воздухе [11]. В то же время активно разрабатываются новые нелинейные кристаллы, перспективные для этой задачи. К таким кристаллам можно отнести халькогениды на основе бария [12], например BaGa_4Se_7 , который активно исследуется китайскими учеными [6, 7]. Также интерес представляет кристалл HgGa_2S_4 , поскольку в работе [8] отмечается, что он на 20% эффективнее AgGaS_2 для преобразования фемтосекундных лазерных импульсов.

Таким образом, в настоящей работе для повышения эффективности и эксплуатационных характеристик ГРЧ фемтосекундных импульсов иттербиевого волоконного лазера в средний ИК диапазон исследованы кристаллы AgGaS_2 , BaGa_4Se_7 и HgGa_2S_4 .

2. Описание эксперимента

Эксперименты проводились с использованием блока ГРЧ (PARUS DFG), входящего в коммерческую лазерную систему на основе фемтосекундного иттербиевого волоконного лазера ТЕТА-20 (ООО «Авеста проект», Россия). Упрощенная схема лазерной системы представлена на рис.1.

Иттербиевый волоконный лазер излучал импульсы с длиной волны 1.03 мкм, длительностью 0.25 пс и частотой следования 10 кГц. Средняя мощность излучения на входе в параметрический преобразователь PARUS-550 составляла 5 Вт, что соответствует энергии импульсов 0.5 мДж. В параметрическом преобразователе формировались два импульса с различными длинами волн: первый перестраивался в спектральном диапазоне 0.63–1.02 мкм, второй – 1.04–2.8 мкм. Второй, длинноволновый, импульс параметрического преобразователя с мощностью до 0.01 Вт направлялся в блок ГРЧ, где использовался как сигнальная волна. Остаточное излучение основной частоты лазера (1.03 мкм, мощность ~0.8 Вт) после нелинейного преобразования в параметрическом генераторе также направлялось в блок ГРЧ и использовалось в каче-

И.О.Киняевский, Н.А.Смирнов, А.В.Корибут, М.В.Ионин,
С.И.Кудряшов. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН,
Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53;
e-mail: kinyaevskiyio@lebedev.ru

Д.В.Бадиков. Кубанский государственный университет, Россия,
350040 Краснодар, ул. Ставропольская, 149

Г.К.Сафаралиев. Российский университет дружбы народов,
Россия, 117198 Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6

Поступила в редакцию 6 августа 2024 г., после доработки – 27 сентября 2024 г.

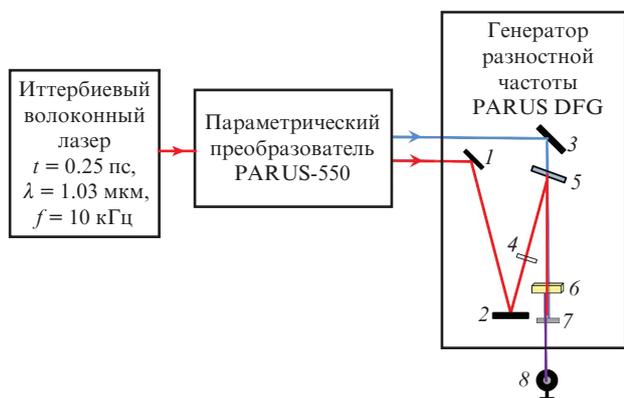


Рис. 1. Оптическая схема эксперимента:

1–3 – поворотные зеркала; 4 – $\lambda/2$ пластинка; 5 – дихроичное зеркало; 6 – нелинейный кристалл; 7 – оптический фильтр для ГРЧ; 8 – измеритель мощности.

стве волны накачки нелинейного кристалла. Импульсы волны накачки и сигнальной волны сводились в пространстве с помощью дихроичного зеркала и направлялись в нелинейный кристалл. Мощность лазерного пучка с апертурой ~ 1 мм, падающего на нелинейный кристалл, не регулировалась. Отметим, что поляризация волны накачки была повернута на 90° с помощью полуволновой пластинки. Излучение ГРЧ, вышедшее из нелинейного кристалла, выделялось спектральным фильтром (плоскопараллельная пластина из Ge) и направлялось в измеритель мощности Ophir-3A.

В эксперименте исследовались образцы кристаллов AgGaS_2 , BaGa_4Se_7 и HgGa_2S_4 , которые обладают близкой шириной запрещенной зоны (около 2.7–2.8 эВ) [12, 13]. Основные свойства кристаллов представлены в табл.1, данные для BaGa_4Se_7 были взяты из [12], а для AgGaS_2 и HgGa_2S_4 – из [13]. Отметим, что используемый в экспери-

менте блок ГРЧ изначально базировался на кристалле AgGaS_2 . Образцы кристаллов BaGa_4Se_7 и HgGa_2S_4 , используемые в эксперименте, были выращены в КубГУ.

3. Результаты эксперимента

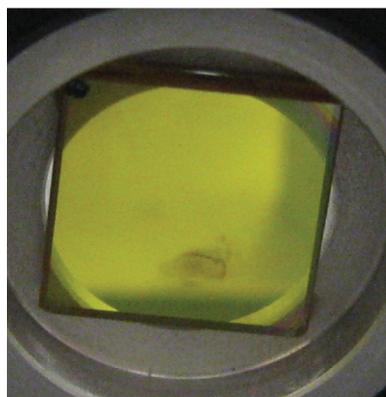
На рис.2 представлены фотографии кристаллов после эксперимента. На рис.2,а можно заметить, что в нижней части кристалла AgGaS_2 видна область потемнения, это вызвано повреждением/деградацией кристалла во время его эксплуатации. В процессе эксперимента с кристаллом BaGa_4Se_7 в области пучка излучения также наблюдалось образование помутнения, однако после завершения эксперимента (рис.2,б) следы помутнения/деградации кристалла не обнаружены. Признаки разрушения/деградации кристалла HgGa_2S_4 не наблюдались ни во время, ни после эксперимента (рис.2,в).

В эксперименте измерялась средняя мощность излучения генератора разностной частоты $\langle P \rangle$ в зависимости от длины волны ГРЧ (рис.3,а), которая контролировалась по длине волны излучения сигнальной волны. Также для проверки длина волны ГРЧ была измерена с помощью самодельного ИК спектрографа на базе пироэлектрической линейки, подробные характеристики которого описаны в [14]. Характерный спектр импульса ГРЧ с центральной длиной волны 5.2 мкм представлен на рис.3,б.

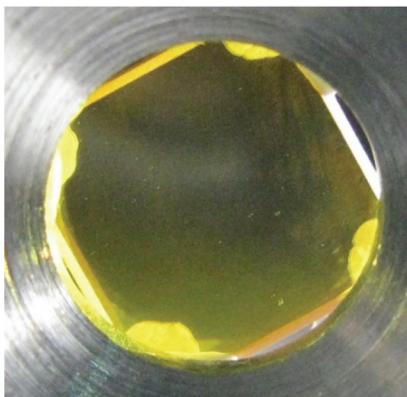
Из рис.3,а видно, что во всех нелинейных кристаллах наблюдалось уменьшение мощности ГРЧ с ростом длины волны, это связано с увеличением рассогласования групповых скоростей, а также с уменьшением соотношения Мэнли–Роу (уменьшением энергии фотона с увеличением длины волны). В диапазоне длин волн 4–7 мкм кристаллы BaGa_4Se_7 и AgGaS_2 оказались практически одинаковыми по эффективности, при этом кристалл HgGa_2S_4 продемонстрировал в 2-3 раза большую эффективность по сравнению с этими кристаллами. Средняя мощность

Табл.1.

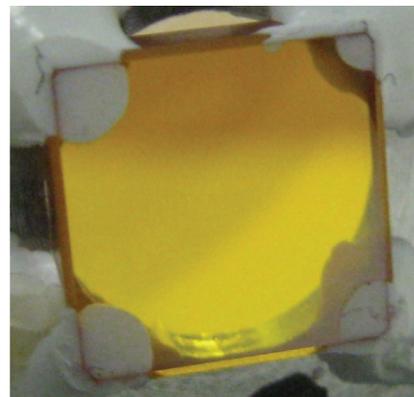
Кристалл	Диапазон прозрачности (мкм)	Размер (Ш×В×Д) (мм)	Угол среза		Нелинейный коэффициент (пм/В)	Порог оптического разрушения (ГВт/см ²) ($\lambda = 1.06$ мкм, $t = 30$ нс)
			φ (°)	θ (°)		
AgGaS_2	0.48–11.4	9×9×3	45	50	$d_{36} = 12.5$	0.02
BaGa_4Se_7	0.34–13.3	8×8×2	0	45	$d_{23} = 14.2$	0.1
HgGa_2S_4	0.55–12.4	8×8×2	0	44	$d_{36} = 24$	0.06



а



б



в

Рис.2. Фотографии кристаллов AgGaS_2 (а), BaGa_4Se_7 (б) и HgGa_2S_4 (в).

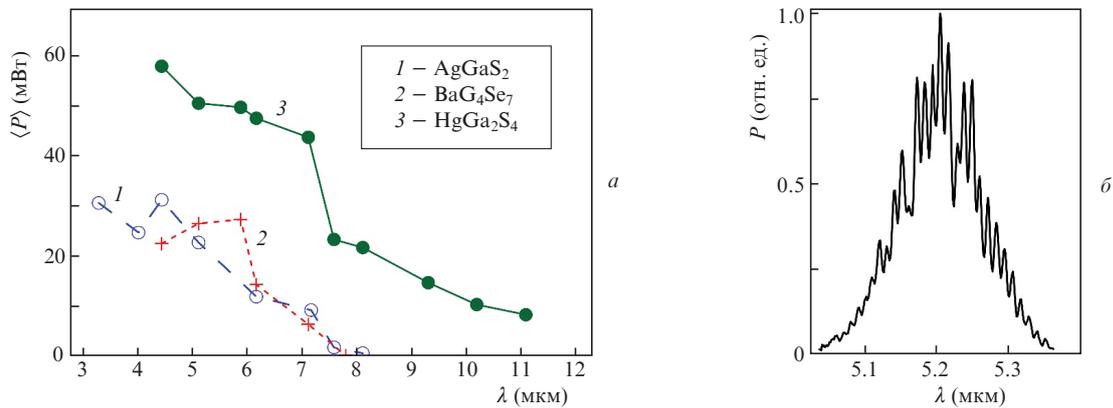


Рис.3. Зависимости средней мощности излучения ГРЧ от его длины волны в кристаллах AgGaS_2 , BaGa_4Se_7 и HgGa_2S_4 (а), а также спектр ГРЧ с центральной длиной волны 5.2 мкм, полученный с кристаллом AgGaS_2 (б).

излучения ГРЧ с длиной волны ~ 4 мкм, полученная в кристалле HgGa_2S_4 , составляла ~ 60 мВт, что соответствует энергии импульсов ~ 6 мкДж. Эффективность ГРЧ по средней мощности относительно мощности волны накачки достигала $\sim 7.5\%$. Отметим, что угол среза нашего образца HgGa_2S_4 не позволил получить излучение с длиной волны менее 4 мкм. С кристаллом HgGa_2S_4 получена перестройка длины волны излучения ГРЧ до 11 мкм, при этом энергия импульсов ГРЧ в этой спектральной области составляла ~ 1 мкДж. С кристаллами BaGa_4Se_7 и AgGaS_2 зарегистрировать излучение ГРЧ с длиной волны выше 8 мкм не удалось из-за его малой мощности.

4. Заключение

Проведено сравнительное исследование кристаллов AgGaS_2 , BaGa_4Se_7 и HgGa_2S_4 в генераторе разностной частоты, базирующемся на фемтосекундном иттербиевом волоконном лазере: длина волны 1.03 мкм, длительность импульса 0.25 пс и частота следования импульсов 10 кГц, средняя мощность 5 Вт. Показано, что среди рассмотренных кристаллов наилучшим для исследуемой системы является HgGa_2S_4 . С этим кристаллом получена генерация лазерных импульсов с длиной волны 4 мкм и энергией до 6 мкДж (эффективность преобразования до 7.5%). В диапазоне перестройки длины волны от 4 до 7 мкм HgGa_2S_4 продемонстрировал в 2-3 раза большую эффективность, чем AgGaS_2 и BaGa_4Se_7 . При этом признаков разрушения или деградации HgGa_2S_4 не наблюдалось. Большая эффективность кристалла HgGa_2S_4 обусловлена тем, что при сопоставимой с AgGaS_2 и BaGa_4Se_7 ширине запрещенной зоны он обладает почти в два раза большей нелинейностью (см. табл.1).

Используя кристалл HgGa_2S_4 , удалось расширить спектральный диапазон коммерческого генератора раз-

ностной частоты до 11 мкм, что делает возможным его применение для формирования затравочного импульса для CO_2 -лазерных усилителей высокого давления [15]. Результаты этого исследования также могут быть использованы для повышения эффективности и других генераторов разностной частоты, как в [9, 10].

1. Емелин М.Ю., Рябикин М.Ю. *Квантовая электроника*, **43** (3), 211 (2013) [*Quantum Electron.*, **43** (3), 211 (2013)].
2. Mareev E., Pushkin A., Migal E., Lvov K., Stremoukhov S., Potemkin F. *Sci. Rep.*, **12** (1), 7517 (2022).
3. Шельгина С.Н., Сараева И.Н., Толордава Э.Р., Настулявичус А.А., Кудряшов С.И. *Краткие сообщения по физике ФИАН*, №10, 29 (2023).
4. Pires H., Baudisch M., Sanchez D., Hemmer M., Biegert J. *Prog. in Quantum Electron.*, **43**, 1 (2015).
5. Vasilyev S., Mirov M., Gapontsev V. *Opt. Express*, **22** (5), 5118 (2014).
6. Tian K., Wang W., Li C., Wan Z., Hu B., He L., Xiang M., Yao J., Wu H., Liang H. *Opt. Lett.*, **47** (22), 5973 (2022).
7. Liu Y., Li Z., Yao J., Wang H., Zhu Z., Bai J., Fu J., Lu Y., Zheng Y., Tan R., Ke Ch., Yuan H. *Opt. Lett.*, **49** (11), 3255 (2024).
8. Rotermund F., Petrov V., Noack F. *Opt. Commun.*, **185** (1-3), 177 (2000).
9. Киняевский И.О., Корибут А.В., Грудцын Я.В., Ионин М.В. *Письма в ЖЭТФ*, **119** (10), 733 (2024).
10. Kinyaevskiy I.O., Koribut A.V., Seleznev L.V., Klimachev Y.M., Dunaeva E.E., Ionin A.A. *Opt. Laser Technol.*, **169**, 110035 (2024).
11. Catella G.C., Burlage D. *MRS Bulletin*, **23** (7), 28 (1998).
12. Kostyukova N., Erushin E., Boyko A., Shevyrdyaeva G., Badikov D. *Photonics*, **11** (3), 281 (2024).
13. Dmitriev V.G., Gurzadyan G.G., Nikogosyan D.N. *Handbook of Nonlinear Optical Crystals* (Berlin, Heidelberg: Springer, 1999, Springer Series in Optical Sciences (Vol. 64)); https://doi.org/10.1007/978-3-540-46793-9_2.
14. Ионин А.А., Киняевский И.О., Козлов А.Ю., Сеницын Д.В. *Приборы и техника эксперимента* (2024) (в печати).
15. Pogorelsky I.V., Polyanskiy M.N., Babzien M., Simmonds A., Palmer M.A. *Front. Phys.*, **12**, 1390225 (2024).