

# ПИКОСЕКУНДНАЯ ЛАЗЕРНАЯ СИСТЕМА С ДЛИНОЙ ВОЛНЫ ~11 МКМ

*И. О. Киняевский<sup>1</sup>, А. В. Корибут<sup>1</sup>, Я. В. Грудцын<sup>1</sup>, Л. В. Селезнев<sup>1</sup>, В. И. Ковалев<sup>1</sup>,  
Е. Э. Дунаева<sup>1</sup>, А. А. Ионин<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

## Введение

Лазерные системы, излучающие импульсы ультракороткой (фемто- и пикосекундной) длительности с пиковой мощностью, достигающей тераватт и даже петаватт [1], являются уникальным инструментом для экспериментальных исследований в области нелинейной оптики, физики плазмы, ускорения частиц и ряда других. При этом для ряда применений лазерные системы среднего ИК-диапазона являются более предпочтительными по сравнению с системами ближнего ИК-диапазона, поскольку пондеромоторная сила электромагнитного поля и критическая плотность плазмы зависят от длины волны излучения как  $\lambda^2$  и  $\lambda^{1/2}$ , соответственно [2]. Среди таких применений можно отметить ускорение частиц и генерацию аттосекундных импульсов [3], а также нелинейно-оптическое распространение лазерного импульса в воздухе, что может открыть новые возможности для атмосферных приложений в окне прозрачности атмосферы 8–14 мкм [4].

Наиболее перспективная схема, для получения мощных ультракоротких лазерных импульсов с длиной волны 10–11 мкм является гибридная. В этой схеме твердотельный задающий генератор (ЗГ) обеспечивает лазерный импульс с заданными спектральными и временными характеристиками, а требуемая энергия достигается при его усилении в газовом усилителе. На данный момент нам известна единственная в мире гибридная пикосекундная лазерная система с длиной волны ~10 мкм – Brookhaven Accelerator Test Facility (ATF CO<sub>2</sub> laser) в Brookhaven National Laboratory, США [5, 6]. Ранее была анонсирована возможность выхода этой лазерной системы на уровень мощности в 100 ТВт [6], однако на данный момент, судя по публикациям, её пиковая мощность в лазерном импульсе длительностью 2 пс составляет ~5 ТВт [5].

В представляемых материалах будут описаны последние результаты исследований, проводимых в ОКРФ ФИАН, направленные на разработку твердотельной лазерной системы, излучающей импульсы длительностью ~1 пс и длиной волны 10–11 мкм, которая планируется использоваться как ЗГ для мощной гибридной лазерной системы среднего ИК-диапазона.

## Экспериментальная схема

Разрабатываемый твердотельный лазерный источник, излучающий мощные (суб) пикосекундные импульсы с центральной длиной волны в районе 10–11 мкм, будет являться ЗГ гибридной системы: твердотельный задающий генератор и газовый усилитель на основе CO<sub>2</sub>-лазера высокого давления (рис. 1). Отметим, что в работе [5] исходный импульс ЗГ длительностью 0,35 пс испытывал существенное сужение спектральной ширины и увеличение длительности до 2 пс в процессе усиления в регенеративном CO<sub>2</sub>-лазерном усилителе. Поэтому в отличие от схемы ATF CO<sub>2</sub> laser мы рассматриваем схему без регенеративного усилителя, однако в этом случае энергия импульса ЗГ должна достигать 0,1–1 мДж. Поскольку лазерные системы с требуемыми характеристиками коммерчески не доступны, то мы провели исследования по созданию твердотельного ЗГ с применением широко распространенного фемтосекундного титан-сапфирового лазера с энергией импульса ~10 мДж, который сочетает в себе высокую энергетику в ультракоротком лазерном импульсе при развитой технологии его производства и коммерческой доступности.

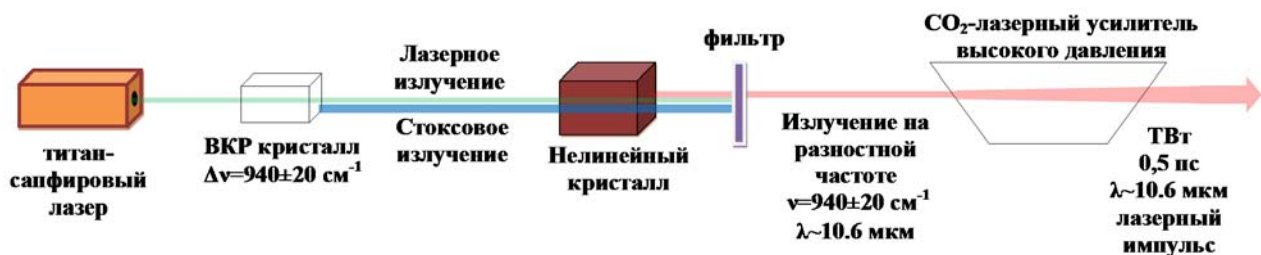


Рис. 1. Принципиальная схема лазерной системы

В экспериментах использовался стартовый титан-сапфировый лазер, входящий в УФ тераваттную гибридную Ti:Sapphire/KrF лазерную систему [7]: длина волны излучения 0,75 мкм, длительность импульса 0,1 пс, энергия в импульсе до 7 мДж. Лазерный импульс с длиной волны 10–11 мкм формировался путем преобразования частоты излучения стартового лазера последовательно в ВКР (вынужденное комбинационное рассеяние) и ГРЧ (генерация разностной частоты) кристаллах. Отметим, что комбинирование процессов ВКР и ГРЧ в одной лазерной системе является нетривиальной задачей. С одной стороны, коэффициент ВКР усиления квадратично возрастает с уменьшением длины волны излучения накачки. С другой стороны согласно соотношению Мэнли–Роу эффективность ГРЧ будет выше для лазерных импульсов с большей длиной волны (меньшей разницей в энергии фотонов накачки и преобразованного излучения).

Для лазерной системы среди множества ВКР-активных сред мы выбрали кристалл  $\text{BaWO}_4$  поскольку, в интересующем нас диапазоне частотных сдвигов (его ВКР частотный сдвиг  $925 \text{ см}^{-1}$  соответствует длине волны излучения 10,8 мкм, близкой к максимуму контура усиления  $\text{CO}_2$ -лазера – 10,6 мкм), он обладает очень высоким коэффициентом ВКР усиления – 8 см/ТВт на длине волны накачки 1064 нм [8]. Также этот кристалл обладает широким диапазоном прозрачности (ширина запрещенной зоны 5,4 еВ) и высокой оптической стойкостью. Отметим, что отклонение частотного ВКР-сдвига  $925 \text{ см}^{-1}$  от максимума контура усиления  $940 \text{ см}^{-1}$  можно скомпенсировать в ГРЧ кристалле за счёт большой ширины спектра стартового фемтосекундного лазера  $\sim 100 \text{ см}^{-1}$ .

Среди нелинейных кристаллов для этапа ГРЧ мы протестировали кристаллы GaSe и LiGaS<sub>2</sub>. Кристалл GaSe широко известен как один из лучших для преобразования лазерных импульсов ближнего ИК-диапазона в средний и дальний-ИК диапазоны [9]. Наш образец GaSe длиной 5 мм. Нелинейный кристалл LiGaS<sub>2</sub> имеет на порядок меньший нелинейный коэффициент, но благодаря большой ширине запрещенной зоны и, соответственно, высокому порогу оптического разрушения он является перспективным для нашей задачи [10]. Образец LiGaS<sub>2</sub> длиной 2 мм был вырезан в плоскости XY ( $\theta = 90^\circ$ ,  $\phi = 37^\circ$ ). Оба типа кристалла имеют достаточное двулучепреломление для выполнения условий фазового синхронизма для преобразования частоты излучения титан-сапфирового лазера в район длины волны 11 мкм.

## Результаты эксперимента

К сожалению, в экспериментах с фемтосекундными импульсами титан-сапфирового лазера зарегистрировать какой-либо сигнал, соответствующий ВКР, нам не удалось. Это связано с тем, что время дефазировки колебаний  $T_2$  в кристалле  $\text{BaWO}_4$  составляет 6,6 пс и значительно больше длительности лазерного импульса (0,1 пс). Это приводит к нестационарности ВКР преобразования и снижению его эффективности. Для фемтосекундных лазерных импульсов также значительно возрастает роль дисперсии среды и сопутствующих нелинейных процессов, таких как нелинейное поглощение, фазовая самомодуляция, самофокусировка и других, которые могут негативно влиять на эффективность преобразования, качество пучка, спектральные и временные характеристики импульса. Поэтому для решения возникшей проблемы лазерные импульсы были растянуты во времени до  $\sim 200$  пс (исходная длительность спектрально ограниченного импульса 0,1 пс).

Чирпированный лазерный импульс с энергией  $\sim 5$  мДж направлялся через линзу с фокусным расстоянием 1 м в кристалл  $\text{BaWO}_4$  длиной 15 мм. Кристалл располагался в сходящемся пучке до фокальной плоскости линзы, при этом интенсивность излучения на передней грани кристалла со-

ставляла  $\sim 1$  ГВт/см<sup>2</sup>. Линейная поляризация лазерного луча была перпендикулярна оптической оси кристалла ВаWO<sub>4</sub>. Для снижения порога ВКР генерации вместе с лазерным импульсом основной частоты следовал широкополосный импульс наносекундной длительности, дающий затравку для стокового излучения [11]. В этом случае наблюдалась генерация стокового импульса с длиной волны 0,8 мкм (рис. 2). Эффективность ВКР преобразования по энергии достигала  $\sim 3$  % [12]. Для дальнейшего увеличения эффективности ВКР преобразования в схему позади первого образца был добавлен второй образец кристалла ВаWO<sub>4</sub> длиной 10 мм. Таким образом, использование схемы с двумя кристаллами ВаWO<sub>4</sub> позволило повысить эффективность ВКР преобразователя до  $\sim 10$  % по энергии (интегральной по спектральному распределению) [11], то есть в  $\sim 3$  раза по сравнению с ранее использованной схемой с одним кристаллом. Однако большая часть этой энергии оказалась распределенной по широкому спектральному интервалу в виде дополнительных пиков (рис. 2). Природа большой спектральной ширины стокового излучения может быть связана с другими нелинейными эффектами, например 4-х волновым смешением. Отметим также, что при добавлении второго кристалла ВаWO<sub>4</sub> в экспериментах наблюдалось смещение положения максимума стокового излучения от 804 нм до 811 нм при неизменных остальных условиях (рис. 2).

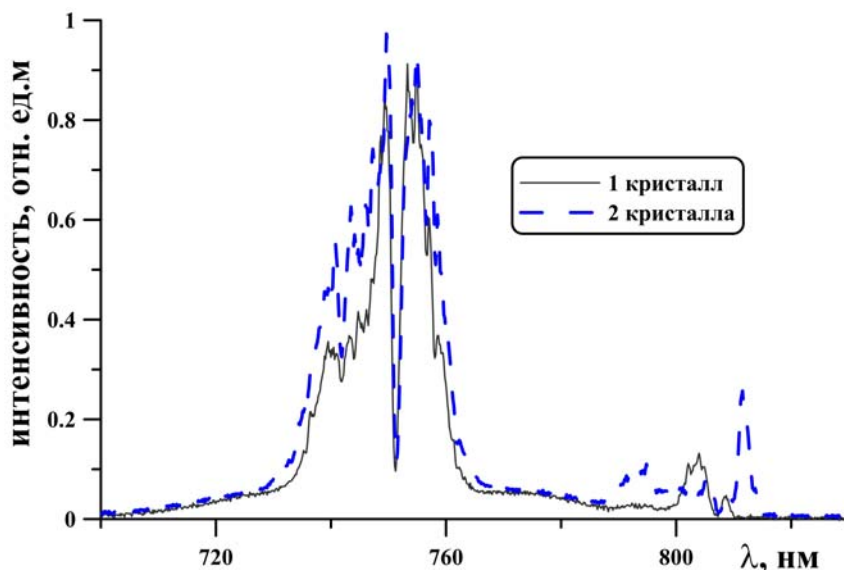


Рис. 2. Спектры излучения на выходе ВКР преобразователя состоящего из 1-го (сплошная линия) и 2-х (пунктирная линия) кристаллов ВаWO<sub>4</sub>

В экспериментах по ГРЧ в средний ИК-диапазон использовалась схема ВКР преобразователя с одним кристаллом ВаWO<sub>4</sub>. Нелинейные кристаллы, GaSe, либо LiGaS<sub>2</sub>, располагались вблизи фокальной плоскости линзы. Процесс ГРЧ в нелинейных кристаллах осуществлялся между основной частотой лазера ( $\lambda \approx 0,75$  мкм) и стоковой ВКР компонентой ( $\lambda \approx 0,8$  мкм). Максимальная эффективность ГРЧ наблюдалась при углах фазового синхронизма (внутренний угол)  $17,9^\circ$  в GaSe и при  $37,4^\circ$  в LiGaS<sub>2</sub> кристаллах. Эти значения оказались в хорошем согласии с рассчитанными.

Энергия импульса среднего ИК-диапазона достигала 60 нДж как для образца GaSe, так и для LiGaS<sub>2</sub> [11]. Это соответствует общей эффективности ВКР+ГРЧ схемы примерно  $10^{-3}$  %. Таким образом, обнаружено, что в наших условиях, несмотря на то, что кристалл LiGaS<sub>2</sub> имел значительно меньший коэффициент нелинейности, он обеспечивал такой же КПД, как и кристалл GaSe. Причиной этого является гораздо более высокий порог оптического повреждения и меньшие оптические потери излучения накачки на нелинейное поглощение.

Спектр импульса среднего ИК-диапазона, измеренный с помощью сканирующего ИК-спектрометра, имел максимум в районе длины волны 11,1 мкм (рис. 3). Спектральная ширина по полувысоте составила 0,2 мкм, которая соответствует длительности спектрально-ограниченного импульса  $\sim 0,9$  пс, что почти на порядок меньше ширины полосы импульса стартового лазера. Это связано с тем, что как импульс основной частоты лазера, так и стоковой компоненты были chirпированы

с одинаковых знаком. Мы полагаем, что увеличение ширины спектра лазерного импульса среднего ИК-диапазона (уменьшения его длительности) возможно при временном сжатии лазерного импульса между этапами ВКР и ГРЧ.

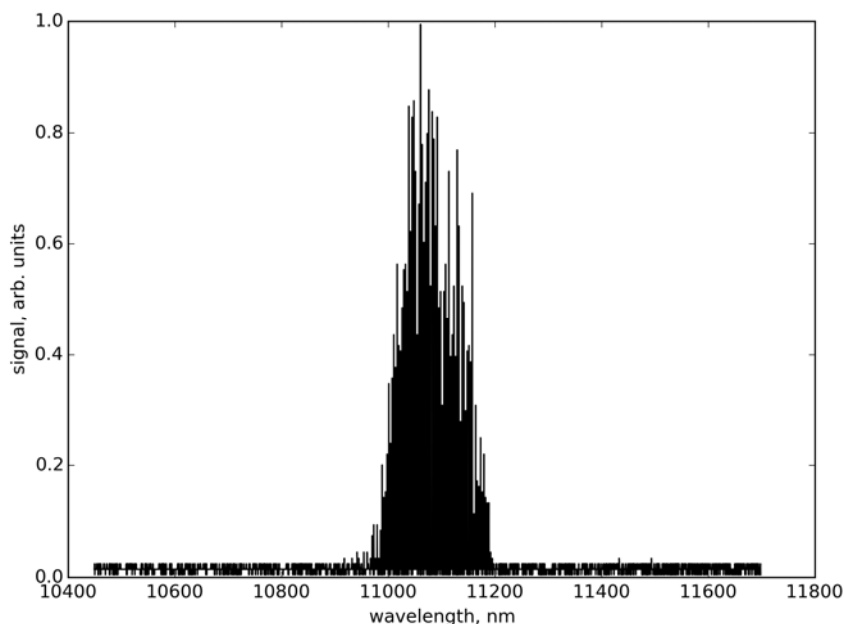


Рис. 3. Спектр импульса среднего ИК-диапазона

### Заключение

Таким образом, разработана твердотельная лазерная система среднего ИК-диапазона, состоящая из фемтосекундного титан-сапфирового лазера, ВКР преобразователя на основе кристалла  $\text{BaWO}_4$  и генератора разностной частоты (кристалл  $\text{GaSe}$  или  $\text{LiGaS}_2$ ). Лазерная система излучала импульсы с энергией до 60 нДж и центральной длиной волны 11,1 мкм. Ширина спектра на полувысоте составила 0,2 мкм, что соответствует спектрально-ограниченной длительности импульса  $\sim 0,9$  пс. Установлено, что использование широкополосной затравки снижает порог ВКР генерации стокового импульса, однако это также приводит к уширению стокового излучения и, как следствие, ограничению эффективности лазерной системы. Для повышения эффективности и энергетичности лазерной системы мы предлагаем перейти к схеме ВКР преобразования чирпированных импульсов без использования дополнительного затравочного излучения, как в работе [13]. Разработанную лазерную систему предполагается использовать в качестве источника затравочных импульсов для  $\text{CO}_2$ - или  $\text{N}_2\text{O}$ -лазеров высокого давления, имеющих максимум усиления в районе длины волны 11 мкм.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-10068, <https://rscf.ru/project/22-79-10068/>.

### Список литературы

1. Коржиманов А. В. и др. Горизонты петаваттных лазерных комплексов // Успехи физических наук. – 2011. – Т. 181. – №. 1. – С. 9–32.
2. Pogorelsky I. V. et al. New opportunities for strong-field LPI research in the mid-IR // Relativistic Plasma Waves and Particle Beams as Coherent and Incoherent Radiation Sources. – SPIE, 2015. – Т. 9509. – С. 69–78.
3. Mitrofanov A. V. et al. Chirp-controlled high-harmonic and attosecond-pulse generation via coherent-wake plasma emission driven by mid-infrared laser pulses // Optics Letters. – 2020. – Т. 45. – №. 3. – С. 750–753.

4. Tochitsky S. et al. Megafilament in air formed by self-guided terawatt long-wavelength infrared laser // *Nature Photonics*. – 2019. – Т. 13. – №. 1. – С. 41–46.
5. Polyanskiy M. N. et al. Demonstration of a 2 ps, 5 TW peak power, long-wave infrared laser based on chirped-pulse amplification with mixed-isotope CO<sub>2</sub> amplifiers // *OSA Continuum*. – 2020. – Т. 3. – №. 3. – С. 459–472.
6. Babzien M., Pogorelsky I. V., Polyanskiy M. Design and Applications of the Brookhaven 100 TW CO<sub>2</sub> Laser // *Quantum Information and Measurement*. – Optica Publishing Group, 2014. – С. JW2A. 25.
7. Zvorykin V. D. et al. GARPUN-MTW: A hybrid Ti: Sapphire/KrF laser facility for simultaneous amplification of subpicosecond/nanosecond pulses relevant to fast-ignition ICF concept // *Laser and Particle Beams*. – 2007. – Т. 25. – №. 3. – С. 435–451.
8. Lisinetskii V. A. et al. Measurements of Raman gain coefficient for barium tungstate crystal // *Laser Physics Letters*. – 2005. – Т. 2. – №. 8. – С. 396.
9. Nikogosyan D. N. *Nonlinear optical crystals: a complete survey*. – Springer Science & Business Media, 2006.
10. Grudtsyn Y. V. et al. Broadband (8,5–13,5 μm) intra-pulse difference frequency generation in a LiGaS<sub>2</sub> crystal of a 90 fs 744 nm laser pulse after its continuous redshift in air // *Optics Letters*. – 2021. – Т. 46. – №. 14. – С. 3420–3423.
11. Kinyaevskiy I. O. et al. Stimulated Raman Scattering of Chirped Ti: Sapphire Laser Pulses in BaWO<sub>4</sub> Crystal // *Russian Physics Journal*. – 2022. – Т. 64. – №. 11. – С. 2058–2061.
12. Kinyaevskiy I. O. et al. Frequency down-conversion of a chirped Ti: sapphire laser pulse with BaWO<sub>4</sub> Raman shifter and second-order nonlinear crystal // *Laser Physics Letters*. – 2022. – Т. 19. – №. 9. – С. 095403.
13. Киняевский И. О. и др. Эффективное ВКР чирпированных импульсов титан-сапфирового лазера в кристалле BaWO<sub>4</sub> // *Квантовая электроника*. – 2022. – Т. 52. – №. 3. – С. 278–282.