

Октавный фазовый синхронизм для оптического параметрического усиления однопериодных импульсов среднего инфракрасного диапазона

А. А. Ланин^{+*}, А. М. Желтиков^{+**×^o1)}

⁺ Физический факультет, Международный лазерный центр, МГУ им. Ломоносова, 119992 Москва, Россия

^{*} Российский квантовый центр, 143025 Сколково, Россия

[×] Texas A&M University, 77843 College Station TX, USA

^o Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”, 123098 Москва, Россия

Поступила в редакцию 18 декабря 2015 г.

На основе анализа оптических свойств прозрачных в среднем ИК-диапазоне нелинейных кристаллов показана возможность обеспечения октавного фазового синхронизма для эффективного оптического параметрического усиления недавно полученных в экспериментах однопериодных импульсов электромагнитного излучения в диапазоне длин волн от 3 до 12 мкм.

DOI: 10.7868/S0370274X1603005X

Предельно короткие импульсы электромагнитного излучения с длительностью, близкой к периоду поля, являются новым мощным орудием для исследования быстропротекающих процессов [1–6]. Отклик электронной системы вещества на такие импульсы характеризуется ярко выраженной зависимостью от сдвига фазы несущей поля относительно огибающей импульса [7]. Это обстоятельство открывает новые возможности управления широким классом физических и химических явлений [8]. Однопериодные и субоднопериодные импульсы (ОПИ) все шире используются для генерации аттосекундных импульсов [9], исследования и управления аттосекундной электронной динамикой [8, 10–12], томографии молекулярных орбиталей [13], генерации когерентного рентгеновского излучения [14].

Передовые лазерные технологии позволяют формировать ОПИ в видимом и ближнем инфракрасном (ИК) диапазоне [1, 2]. Вплоть до последнего времени генерацию ОПИ среднего ИК-диапазона удавалось наблюдать лишь в условиях двухчастотной лазерной филаментации сверхкоротких световых импульсов [15]. Такой режим генерации ОПИ дает возможность получить важную информацию о физике двухчастотной филаментации. Однако он не позволяет рассчитывать на создание высокостабильного источника ОПИ среднего ИК-диапазона с надежно воспроизводимыми параметрами. Как показывают вы-

полненные в последние годы исследования [16, 17], задача создания такого источника может быть решена в полностью твердотельном формате на основе последовательного оптического параметрического понижения частоты задающего лазера в кристаллах с квадратичной оптической нелинейностью. Разработанная технология позволяет формировать ОПИ среднего ИК-диапазона микроджоулевого уровня энергии с центральной длиной волны, перестраиваемой в области 4–9 мкм. Вопрос о путях повышения энергии ОПИ, генерируемых в подобных твердотельных системах, остается открытым.

Как показано в настоящей работе, проблема повышения энергии ОПИ, формируемых в полностью твердотельных лазерных системах, может быть решена на основе оптического параметрического усиления (ОПУ) однопериодных и субоднопериодных импульсов в прозрачных в области среднего ИК кристаллах с квадратичной нелинейностью. Анализ оптических свойств таких кристаллов позволяет указать пути достижения сверхширокополосного фазового синхронизма в превышающей октаву полосе частот. В этом режиме обеспечиваются условия, необходимые для высокоэффективного параметрического усиления ОПИ среднего ИК-диапазона.

Предлагаемая полностью твердотельная схема формирования мощных ОПИ (рис. 1) состоит из экспериментального реализованного в работах [16, 17] источника перестраиваемых по частоте сверхкоротких импульсов среднего ИК-диапазона микроджоу-

¹⁾ e-mail: zheltikov@physics.msu.ru

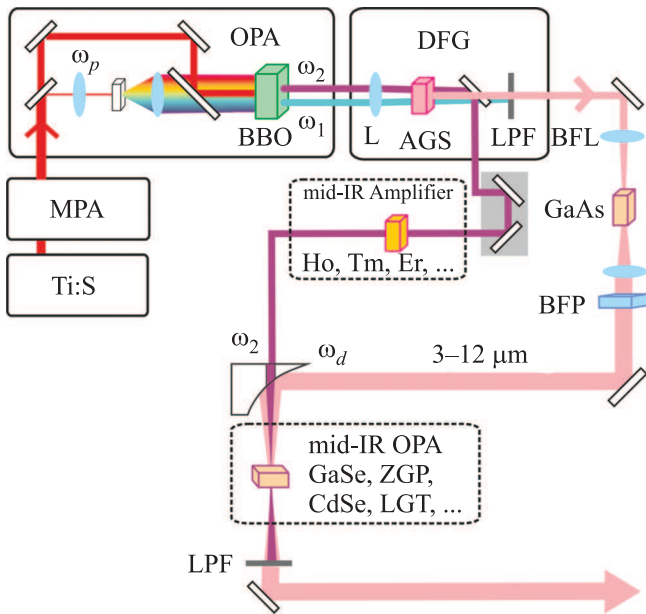


Рис. 1. (Цветной онлайн) Схема оптического параметрического усиления однопериодных импульсов среднего ИК-диапазона: Ti:S – лазерный генератор на кристалле Ti:sapphire; MPA – многопроходный усилитель; OPA – оптический параметрический усилитель; DFG – генератор разностной частоты; BBO, AGS, GaAs – кристаллы бета-бората бария, триаголата серебра и арсенида галлия; LPF – оптический фильтр низких частот; BFP, BFL – пластинка и линза из фторида бария

лева уровня энергии, блока компрессии и формирования ОПИ в среднем ИК, а также каскада усиления ОПИ. В состав источника сверхкоротких импульсов среднего ИК-диапазона входят задающий титансапфировый (Ti:S) лазер с многопроходным усилителем (МПУ), блок оптического параметрического усиления на основе кристалла BBO, а также блок генерации разностной частоты (ГРЧ) на основе кристалла AGS.

В блоке ОПУ в результате процесса трехволнового взаимодействия $\omega_p = \omega_1 + \omega_2$ в нелинейном кристалле (BBO) реализуется параметрическое усиление широкополосного излучения (сигнальное поле с частотой ω_1), генерируемого в пластине GaAs излучением титансапфирового лазера, в поле волны накачки (частота ω_p), обеспечиваемой излучением титансапфирового лазера, с генерацией холостой волны на частоте ω_2 . Холостая и сигнальная волны, генерируемые в результате этого процесса, затем используются для формирования сверхкоротких импульсов среднего ИК-диапазона за счет генерации разностной частоты (ГРЧ) $\omega_d = \omega_1 - \omega_2$ в кристалле AGS. Как показано в работах [16, 17], получаемые при этом

сверхкороткие импульсы имеют характерную энергию 1–15 мкДж с центральной длиной волны, перестраиваемой в области от 3 до 15 мкм.

В зависимости от центральной длины волны формируемые в результате процесса ГРЧ импульсы среднего ИК-диапазона испытывают спектральное уширение или претерпевают спектрально-временное преобразование в режиме аномальной дисперсии в тонкой пластине GaAs, входящей в блок компрессии и формирования ОПИ. Нелинейный сдвиг фазы, приобретаемый этими импульсами в результате указанного процесса, компенсируется с помощью набора тонких пластин из различных материалов, позволяющих достичь необходимой точности коррекции фазы поля.

Оптическое параметрическое усиление ОПИ может быть реализовано за счет процесса трехволнового взаимодействия $\omega_2 = \omega_d + \omega_3$ в кристалле с квадратичной нелинейностью, обеспечивающем необходимый для него сверхширокополосный синхронизм. В качестве поля накачки в процессе ОПУ используется усиленная волна ω_2 , играющая роль холостой волны в процессе ОПУ. Для усиления этой волны могут быть использованы лазерные кристаллы на основе Ho:YAG [18–20], Cr:ZnSe и Cr:ZnS [21, 22], Cr, Er:YSGG [23], а также легированные тулнием волоконные усилители [24, 25]. Эти активные среды обеспечивают необходимую эффективность усиления в области длин волн 2.05, 2.3–2.5, 2.65–2.8 и 1.95 мкм соответственно, перекрывая тем самым значительную часть диапазона перестройки волны ω_2 .

Поскольку ширина спектра импульса длительностью менее оптического периода поля превышает октаву, ключевым критерием выбора нелинейного материала для параметрического усиления ОПИ является возможность реализации сверхширокополосного фазового синхронизма, который позволил бы осуществить усиление во всем спектре импульса. На рис. 2 представлены результаты анализа фазового синхронизма для ряда известных нелинейно-оптических материалов (CdSe, LiGaTe₂ (LGT), ZnGeP₂ (ZGP), GaSe, HgS (HS)), представляющих особый интерес для параметрического усиления ОПИ в среднем ИК-диапазоне. Для этих материалов на картах рис. 2 показан определяющий эффективность параметрического усиления фактор фазового согласования $F = [\sin(\Delta k L/2)]^2 / (\Delta k L/2)^2$ (где L – толщина кристалла, $\Delta k = |\mathbf{k}_2 - \mathbf{k}_d - \mathbf{k}_3|$ – расстройка волновых векторов для процесса трехволнового взаимодействия $\omega_2 = \omega_d + \omega_3$ первого типа; e–oo для GaSe и o–ee для CdSe, LGT, ZGP, HS) в зависимости от длины волны поля накачки $\lambda_2 = 2\pi c/\omega_2$,

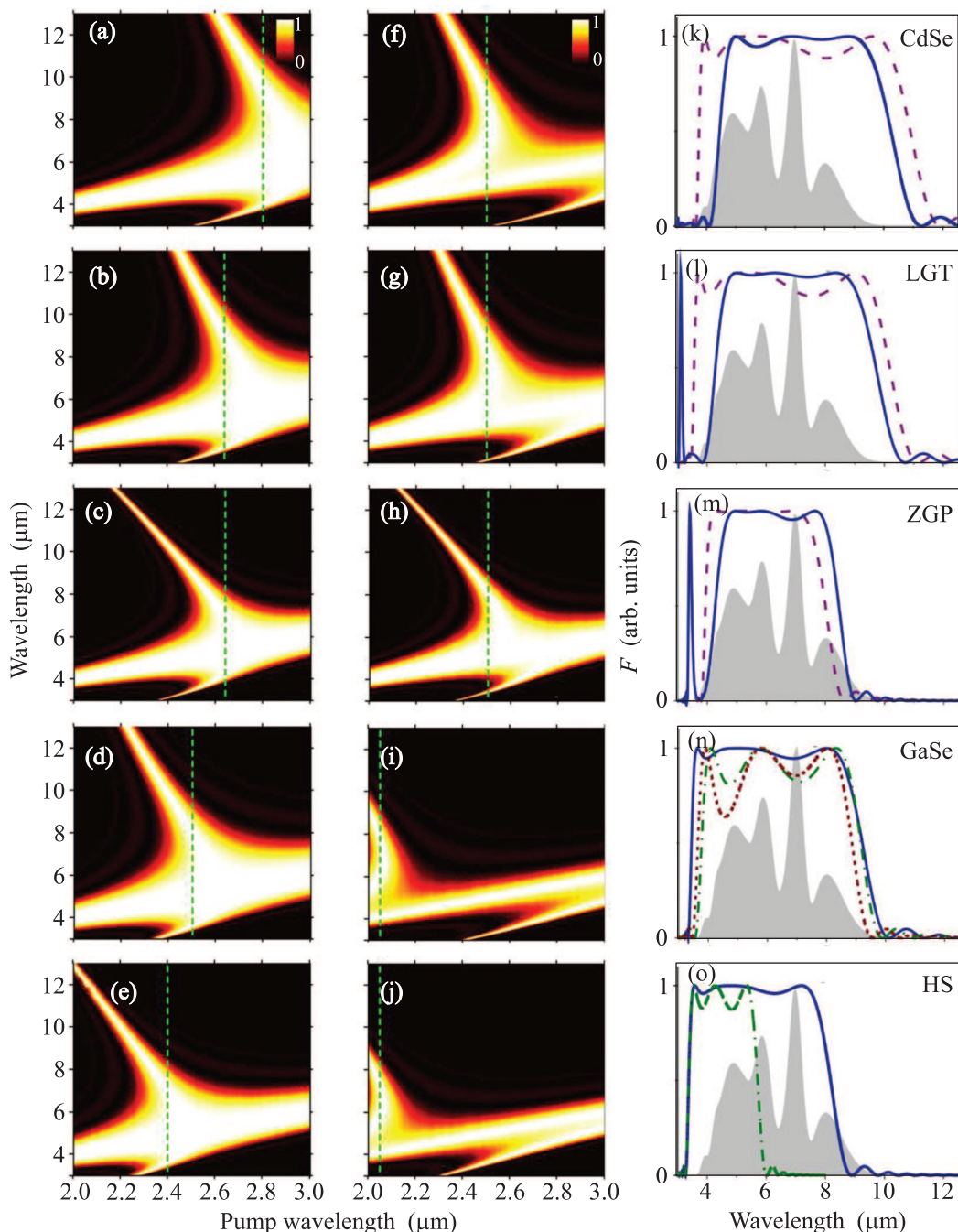


Рис. 2. (Цветной онлайн) Карты фактора F оптического параметрического усиления в зависимости от длины волны поля накачки (ось абсцисс), а также сигнального и холостого поля (ось ординат) при $\varphi = 0$ (а–е), 1.1° (f), 0.85° (g), 0.6° (h), 1.4° (i), 1.33° (j) для кристаллов CdSe (а, f), LGT (b, g), ZGP (c, h), GaSe (d, i), HS (e, j). (к–о) – Профили фактора F для кристаллов CdSe (к), LGT (l), ZGP (m), GaSe (n), HS (o) в поле импульса накачки, усиленного с помощью лазерных кристаллов Cr:ZnSe (синяя линия) на длине волны $\lambda_2 = 2.5$ мкм (к–м) и 2.4 (o), Cr:Er:YSGG (фиолетовая линия) на 2.8 мкм (к) и 2.65 мкм (l, m), Ho:YAG (зеленая линия) на 2.05 мкм (n, o), а также волоконного лазера Tm-fiber (красная линия) на 1.95 мкм (n). Серым цветом показан спектр однопериодного ИК-импульса, полученного в экспериментах [17]. Вертикальными штриховыми линиями на панелях а–j показана центральная длина волны полосы усиления в лазерном кристалле, используемая для усиления поля накачки. Толщина кристалла во всех расчетах принималась равной 5 мм

а также длин сигнальной и холостой волн $\lambda_{d,3} = 2\pi c/\omega_{d,3}$ для различных углов φ между волновыми векторами \mathbf{k}_2 и \mathbf{k}_d . Как видно из представленных результатов, рассматриваемый класс нелинейно-оптических материалов открывает широкие возможности для реализации октавного фазового синхронизма, необходимого для оптического параметрического усиления ОПИ. Достижение октавного фазового синхронизма возможно для различных способов усиления используемого в качестве накачки поля ω_2 . Штриховыми линиями на рис. 2а–j показана длина волны этого поля, получаемая при его усилении с помощью активных сред на основе Ho:YAG, Cr:ZnSe, Cr, Er:YSGG, Tm [18–25]. На рис. 2к–о представлены профили фактора F как функции длины волны λ_d , полученные как одномерные срезы соответствующих карт F на рис. 2а–j. Серой заливкой на рис. 2к–о показан спектр однопериодного импульса среднего ИК-диапазона, полученного в недавних экспериментах [17]. Сравнение профилей фактора F и спектра ОПИ указывает на возможность достижения фазового синхронизма во всей полосе частот, необходимой для эффективного параметрического усиления ОПИ.

Как видно из рис. 2, наиболее широкая полоса параметрического усиления с минимальной модуляцией коэффициента усиления достигается для процесса коллинеарного ($\varphi = 0$) оптического параметрического усиления в кристалле CdSe в поле волны накачки с центральной длиной волны $\lambda_2 = 2.8$ мкм, усиленной с помощью лазерного кристалла Cr:Er:YSGG (рис. 2а и фиолетовая штриховая линия на рис. 2к). Такой режим параметрического усиления, как следует из представленных на рис. 2 результатов, обеспечивается точным согласованием нелинейно-оптического материала для параметрического усиления и лазерного материала (рис. 1), задающего частоту ω_2 поля накачки. Достижимая при этом полоса параметрического усиления имеет резкую высокочастотную границу в районе 3.6 мкм и пологий спад в области 10.5–11.8 мкм, обеспечивая возможность эффективного параметрического усиления импульсов среднего ИК-диапазона с длительностью, существенно меньшей периода поля. Как видно из рис. 2а–j, плавная подстройка полосы параметрического усиления под заданные частоты ω_2 и ω_d полей накачки и ИК-сигнала может осуществляться ценой небольшой потери однородности коэффициента параметрического усиления в пределах полосы усиления путем плавной перестройки угла φ .

Таким образом, выполненный в настоящей работе анализ оптических свойств прозрачных в сред-

нем ИК-диапазоне нелинейных кристаллов позволяет определить режимы, обеспечивающие октавный фазовый синхронизм для эффективного оптического параметрического усиления однопериодных импульсов электромагнитного излучения в диапазоне длин волн от 3 до 12 мкм.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты # 14-29-07182, 15-02-07820). Исследования в области нелинейной оптики в среднем ИК-диапазоне выполнены при поддержке Российского научного фонда (проект # 14-12-00772).

1. E. Goulielmakis, V.S. Yakovlev, A.L. Cavalieri, M. Uiberacker, V. Pervak, A. Apolonski, R. Kienberger, U. Kleineberg, and F. Krausz, *Science* **317**, 769 (2007).
2. A. Wirth, M.Th. Hassan, I. Grguraš, J. Gagnon, A. Moulet, T.T. Luu, S. Pabst, R. Santra, Z.A. Alahmed, A.M. Azzeeer, V.S. Yakovlev, V. Pervak, F. Krausz, and E. Goulielmakis, *Science* **334**, 195 (2011).
3. M.Th. Hassan, A. Wirth, I. Grguraš, A. Moulet, T.T. Luu, J. Gagnon, V. Pervak, and E. Goulielmakis, *Rev. Sci. Instrum.* **83**, 111301 (2012).
4. S.-W. Huang, G. Cirimi, J. Moses, K.-H. Hong, S. Bhardwaj, J.R. Birge, L.-J. Chen, E. Li, B.J. Eggleton, G. Cerullo, and F.X. Kärtner, *Nat. Photon.* **5**, 475 (2011).
5. C. Manzoni, O.D. Mücke, G. Cirimi, S. Fang, J. Moses, S.-W. Huang, K.-H. Hong, G. Cerullo, and F.X. Kärtner, *Laser Photonics Rev.* **9**, 129 (2015).
6. T. Balciunas, C. Fourcade-Dutin, G. Fan, T. Witting, A.A. Voronin, A.M. Zheltikov, F. Jerome, G.G. Paulus, A. Baltuska, and F. Benabid, *Nat. Comm.* **6**, 6117 (2015).
7. T. Brabec and F. Krausz, *Rev. Mod. Phys.* **72**, 545 (2000).
8. A. Baltuška, Th. Udem, M. Uiberacker, M. Hentschel, E. Goulielmakis, Ch. Gohle, R. Holzwarth, V.S. Yakovlev, A. Scrinzi, T.W. Hänsch, and F. Krausz, *Nature* **421**, 611 (2003).
9. P.B. Corkum and F. Krausz, *Nature Phys.* **3**, 381 (2007).
10. M. Schultze, E.M. Bothschafter, A. Sommer, S. Holzner, W. Schweinberger, M. Fiess, M. Hofstetter, R. Kienberger, V. Apalkov, V.S. Yakovlev, M.I. Stockman, and F. Krausz, *Nature* **493**, 75 (2013).
11. H. Akagi, T. Otobe, A. Staudte, A. Shiner, F. Turner, R. Dörner, D.M. Villeneuve, and P.B. Corkum, *Science* **325**, 5946 (2009).
12. M.Th. Hassan, T.T. Luu, A. Moulet, O. Raskazovskaya, P. Zhokhov, M. Garg, N. Karpowicz, A.M. Zheltikov,

- V. Pervak, F. Krausz, and E. Goulielmakis, *Nature* (in press).
13. J. Itatani, J. Levesque, D. Zeidler, H. Niikura, H. Pépin, J. C. Kieffer, P. B. Corkum, and D. M. Villeneuve, *Nature* **432**, 867 (2004).
 14. J. Seres, E. Seres, A. J. Verhoef, G. Tempea, C. Streli, P. Wobrauschek, V. Yakovlev, A. Scrinzi, C. Spielmann, and F. Krausz, *Nature* **433**, 596 (2005).
 15. Y. Nomura, H. Shirai, K. Ishii, N. Tsurumachi, A. A. Voronin, A. M. Zheltikov, and T. Fuji, *Opt. Express* **20**, 24741 (2012).
 16. A. A. Lanin, A. A. Voronin, E. A. Stepanov, A. B. Fedotov, and A. M. Zheltikov, *Opt. Lett.* **39**, 6430 (2014).
 17. A. A. Lanin, A. A. Voronin, E. A. Stepanov, A. B. Fedotov, and A. M. Zheltikov, *Opt. Lett.* **40**, 974 (2015).
 18. P. Malevich, G. Andriukaitis, T. Flöry, A. J. Verhoef, A. Fernández, S. Ališauskas, A. Pugžlys, A. Baltuška, L. H. Tan, C. F. Chua, and P. B. Phua, *Opt. Lett.* **38**, 2746 (2013).
 19. P. Moulton and E. Slobodchikov, in *Quantum Electronics and Laser Science Conference*, Optical Society of America (2011), p. PDPA10.
 20. M. Hemmer, D. Sánchez, M. Jelínek, V. Smirnov, H. Jelinkova, V. Kubeček, and J. Biegert, *Opt. Lett.* **40**, 451 (2015).
 21. N. Tolstik, E. Sorokin, and I. T. Sorokina, *Opt. Lett.* **38**, 299 (2013).
 22. P. Moulton and E. Slobodchikov, *1-GW-Peak-Power, Cr:ZnSe Laser*, in *CLEO:2011 – Laser Applications to Photonic Applications*, OSA Technical Digest (CD), Optical Society of America (2011), p. PDPA10.
 23. L. Wang, J. Wang, J. Yang, X. Wu, D. Sun, S. Yin, H. Jiang, J. Wang, and C. Xu, *Opt. Lett.* **38**, 2150 (2013).
 24. P. F. Moulton, G. Rines, E. V. Slobodtchikov, K. F. Wall, G. Frith, B. Samson, and A. L. Carter, *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics* **15**, 85 (2009).
 25. Q. Fang, W. Shi, K. Kieu, E. Petersen, A. Chavez-Pirson, and N. Peyghambarian, *Opt. Express* **20**, 16410 (2012).