09

Генерация и временна́я компрессия импульсов второй гармоники спектрально-уширенного излучения фемтосекундного иттербиевого лазера

© Л.Л. Лосев, В.С. Пазюк

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия
E-mail: lllosev@mail.ru

Поступило в Редакцию 1 апреля 2025 г.
В окончательной редакции 8 июля 2025 г.
Принято к публикации 1 августа 2025 г.

Показано, что использование схемы генерации второй гармоники с двумя последовательно расположенными кристаллами KDP позволяет достичь эффективности преобразования чирпированного импульса излучения иттербиевого лазера до 50 %. Полученные импульсы второй гармоники со спектром, соответствующим спектрально-ограниченному импульсу длительностью 7 fs, компрессированы до 9 fs.

Ключевые слова: вторая гармоника, фемтосекундные лазеры, сжатие импульса.

DOI: 10.61011/PJTF.2025.21.61524.20331

В нашей предыдущей работе [1] была предложена и экспериментально реализована схема преобразования импульса ИК-излучения иттербиевого лазера с длительностью 230 fs и длиной волны 1030 nm в излучение видимого диапазона с длительностью импульса 11 fs при энергетической эффективности преобразования более 20 %. Схема включала два этапа нелинейного преобразования. На первом этапе осуществлялось уширение спектра ИК-импульса в процессе нелинейной фазовой самомодуляции при распространении импульса в газонаполненном капилляре. На втором этапе модулированный по фазе (чирпированный) импульс преобразовывался во вторую гармонику с длиной волны 515 nm в двулучепреломляющем кристалле. При этом происходило дополнительное уширение спектра. Затем чирпированный импульс второй гармоники сжимался во времени в призменном компрессоре.

Процесс уширения спектра импульса при фазовой самомодуляции в газонаполненном капилляре детально исследован в работах [2,3] и широко применяется в схемах с временно́й компрессией лазерных импульсов. В работе [1] использовался кварцевый капилляр, заполненный криптоном. Спектр импульса на выходе капилляра соответствовал спектрально-ограниченному импульсу с длительностью 13 fs. Схема с кварцевым капилляром оказалась достаточно стабильной и надежной в эксплуатации. Пропускание капилляра, заполненного инертным газом, на уровне 75 % не менялось в течение нескольких месяцев работы.

В работе [4] показано, что при эффективном преобразовании чирпированного импульса во вторую гармонику можно достичь двукратного уширения спектра импульса гармоники по отношению к спектру импульса на основной частоте. Кристаллы KDP как обладающие наиболее широкой полосой частотного синхронизма в области 1000 nm [5] были выбраны для генерации второй гармоники [1]. Двукратное уширение спектра импульса и генерация импульсов со спектром, соответствующим спектрально-ограниченному импульсу длительностью 7 fs, были получены для кристалла KDP толщиной 0.5 mm. Малая толщина кристалла и нелинейные эффекты, возникающие при высокой интенсивности излучения [6], не позволили в таком кристалле получить эффективность преобразования выше 20 %. При увеличении толщины кристалла до 1 mm была достигнута эффективность генерации гармоники выше 40 %. Однако в этом случае из-за сужения полосы частотного синхронизма, которая обратно пропорциональна толщине кристалла, произошло сужение спектра второй гармоники и увеличение длительности спектрально-ограниченного импульса до 10 fs. Таким образом, из-за возникающих трудностей при достижении высокой эффективности преобразования, сопровождающейся двукратным уширением спектра гармоники и соответственно получением наиболее короткого импульса после временно́й компрессии, возможности схемы не были реализованы в полном объеме.

Целью настоящей работы было исследование возможности генерации второй гармоники чирпированного импульса излучения фемтосекундного иттербиевого лазера с эффективностью до 50 % для получения после временно́й компрессии суб-10 fs импульсов видимого диапазона гигаваттной мощности.

Оптическая схема экспериментальной установки показана на рис. 1, *a*. В качестве источника лазерного излучения использовалась фемтосекундная иттербиевая лазерная система с длиной волны излучения 1030 nm, построенная по схеме волоконный генератор–твердотельный регенеративный усилитель (TETA 6, Avesta). Длительность импульса составляла 230 fs. Ширина спектра по уровню половины интенсивности — 7 nm. Максимальная энергия импульса достигала 400 μJ. Эксперименты

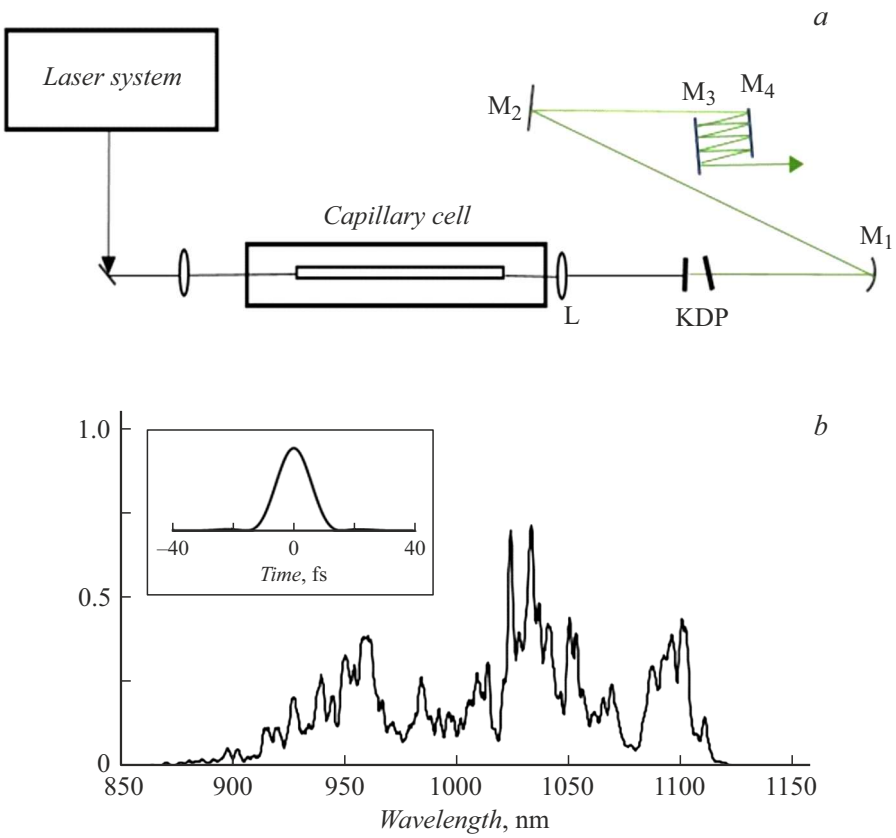

Рис. 1. *a* — оптическая схема экспериментальной установки. KDP — кристаллы KH_2PO_4, L — линза с фокусом 150 mm, M_1 и M_2 — зеркала с серебряным покрытием, M_3 и M_4 — чирпированные зеркала; *b* — спектр импульса на выходе капилляра при энергии импульса иттербиевого лазера 170 μJ и давлении криптона 8 atm. На вставке показана форма рассчитанного спектрально-ограниченного импульса с длительностью 13 fs по уровню половины интенсивности.

проводились при частоте повторения импульсов 10 kHz. Уширение спектра импульса осуществлялось в процессе фазовой самомодуляции при распространении лазерного импульса в кварцевом капилляре с внутренним диаметром 250 μm и длиной 70 cm. Капилляр размещался в камере длиной 125 cm, заполненной сжатым криптоном.

Регистрация спектра импульса проводилась спектрометром ASP-75m (Avesta). Длительность импульса измерялась одноимпульсным автокоррелятором ASF-5 (Avesta) на основе неколлинеарной генерации второй гармоники. В автокорреляторе использовалась только отражательная оптика с металлическими зеркалами. Неколлинеарная генерация второй гармоники осуществлялась в кристалле BBO толщиной 10 μm.

При проведении экспериментов варьирование энергии лазерного импульса проводилось одновременно с изменением давления криптона с целью сохранения максимальной ширины спектра импульса на выходе капилляра, которая достигается при приближении мощности импульса к критической мощности самофокусировки [3]. Начало процесса самофокусировки регистрировалось по снижению пропускания капилляра. Было установлено, что ширина спектра импульса на выходе капилляра не меняется при следующей связи энергии импульса на выходе из капилляра E и давления криптона p: $E\,[\mu\text{J}] = 900/p\,[\text{atm}]$. Пропускание капилляра сохранялось при варьировании давления и энергии импульса и составляло 75 % при расчетном значении 82 %. На рис. 1, *b* представлены измеренная форма спектра импульса на выходе капилляра и рассчитанная для данного спектра форма спектрально-ограниченного импульса, длительность которого составила 13 fs.

Для повышения эффективности генерации второй гармоники широкополосного чирпированного импульса была применена схема с двумя двулучепреломляющими кристаллами [4,7]. В такой схеме используются кристаллы толщиной T, при которой полоса частотного синхронизма кристалла примерно в 2 раза меньше ширины спектра чирпированного импульса. При этом кристаллы ориентируются под таким углом к направлению распространения светового пучка, чтобы в каждом кристалле преобразовывалась в гармонику половина спектра и соответственно часть энергии чирпированного импульса. В результате полоса частотного синхронизма двух кристаллов толщиной T будет эквивалентна полосе синхронизма кристалла толщиной $T/2$. А эффективность преобразования в гармонику будет соответствовать кристаллу толщиной T. Так как интенсивность излучения

второй гармоники квадратично растет при увеличении толщины кристалла [8], эффективность преобразования в гармонику при использовании схемы с двумя кристаллами может быть повышена по сравнению со стандартной схемой с одним кристаллом.

В настоящей работе использовались кристаллы KDP толщиной $T = 1$ mm каждый. Преобразование во вторую гармонику осуществлялось по первому типу фазового синхронизма. Кристаллы размещались в области фокальной перетяжки, формируемой линзой L (рис. 1, *a*). На поверхности кристаллов диаметр светового пучка основного излучения с близким к гауссову распределением интенсивности составлял 300 μm по уровню $1/e^2$. Расстояние между кристаллами равнялось 20 mm [4].

Максимально широкая полоса частотного синхронизма для кристаллов KDP первого типа реализуется для длины волны основного излучения, равной 1034 nm, и угла фазового синхронизма 41.169° [5]. При отстройке от угла синхронизма (повороте кристалла) происходит расщепление полосы синхронизма на две более узкие частотные области, которые расходятся в коротковолновую и длинноволновую стороны спектра при увеличении угла отстройки. Данная особенность вызвана немонотонной зависимостью показателя преломления обыкновенного луча кристалла KDP от длины волны в области 1000 nm [5].

На рис. 2, *a* показан спектр второй гармоники, полученный в схеме с двумя кристаллами. Проводилась настройка углов обоих кристаллов для достижения максимальной ширины спектра второй гармоники и эффективности преобразования. В оптимальном режиме получен спектр с длительностью соответствующего спектрально-ограниченного импульса, равной 7.1 fs. На рис. 2, *b* и *c* представлены спектры второй гармоники для случаев, когда после ориентировки кристаллов для получения максимально широкого спектра один из кристаллов убирался. На рис. 2, *b* показан спектр второй гармоники на выходе из первого (по отношению к входу в кристаллы основного излучения) кристалла. Видно, что кристалл выставлен так, чтобы обеспечить максимально эффективное преобразование в коротковолновую — синюю область спектра. На этом рисунке хорошо видны две спектральные области фазового синхронизма. На рис. 2, *c* показан спектр второй гармоники на выходе второго кристалла после удаления из оптического тракта первого кристалла. Данный кристалл, как следует из рисунка, был настроен для преимущественного преобразования длинноволнового крыла спектра основного излучения.

Зависимость эффективности генерации второй гармоники от энергии импульса основного излучения показана на рис. 3, *a*. Использование схемы с двумя кристаллами позволило расширить по сравнению со схемой с одним кристаллом диапазон энергий импульсов основного излучения (в сторону меньших энергий), при котором наблюдается преобразование с эффективностью

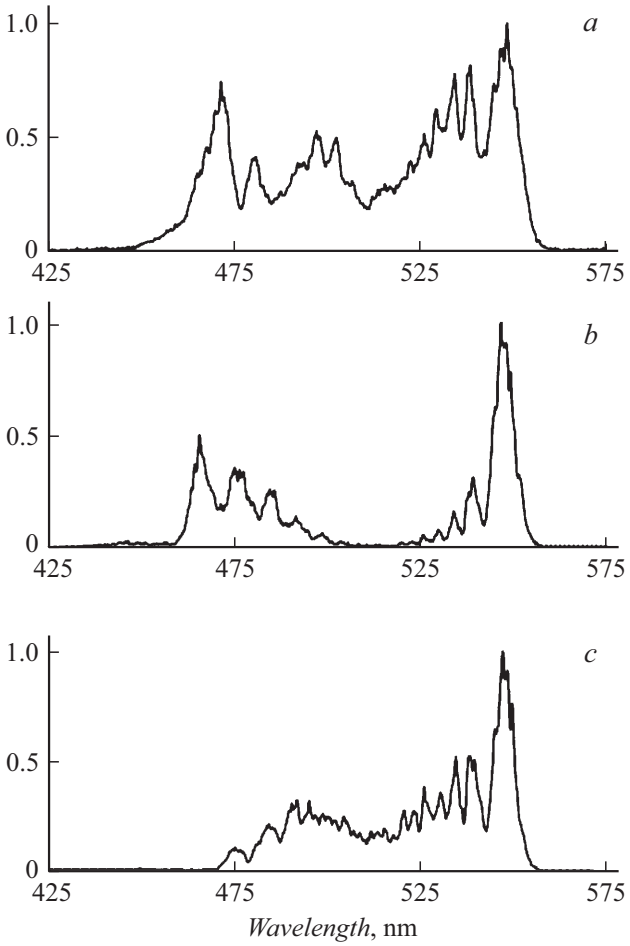

Рис. 2. Спектры импульсов второй гармоники: *a* — для двух кристаллов KDP; *b* — спектр после первого (по направлению распространения светового пучка) кристалла; *c* — спектр после второго кристалла в отсутствие первого.

выше 45 % [1]. При изменении энергии импульса основного излучения от 70 до 180 μJ (давление Kr от 13 до 5 atm) эффективность преобразования сохранялась в пределах 45–50 %. При этом длительность спектрально-ограниченного импульса, рассчитанного исходя из спектра гармоники, не превышала 8 fs (рис. 3, *a*).

Для сжатия чирпированного импульса второй гармоники использовались чирпированные зеркала, позволяющие обеспечить более точную компенсацию положительного частотного чирпа компрессируемого импульса (по сравнению с призменным компрессором). Излучение второй гармоники на выходе из кристаллов коллимировалось зеркалом с серебряным покрытием M_1 (рис. 1, *a*) и плоским серебряным зеркалом M_2 и направлялось в компрессор из чирпированных зеркал M_3 и M_4. Расстояние между чирпированными зеркалами составляло 100 mm. Энергетическая эффективность компрессора, включая потери на серебряных зеркалах для ввода излучения, равнялась 80 %. На рис. 3, *b* показана автокорреляционная функция компрессированного

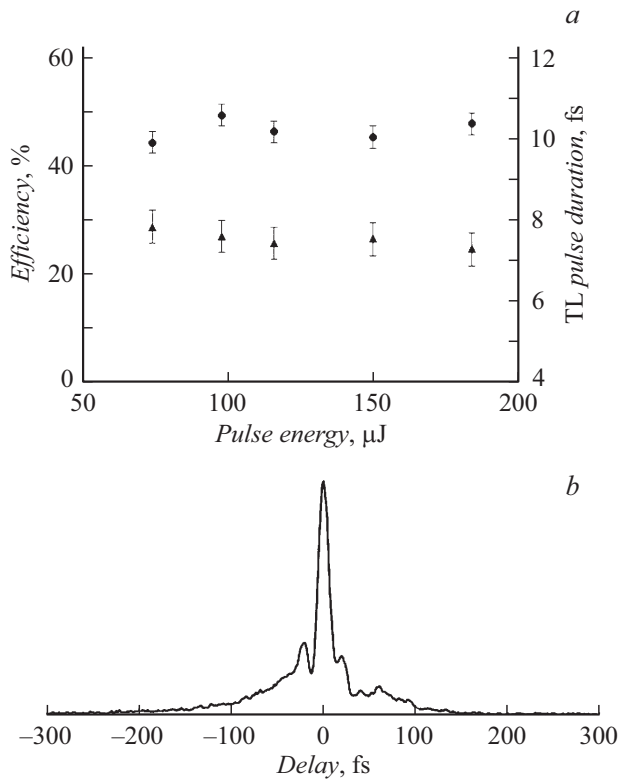

Рис. 3. *a* — эффективность преобразования во вторую гармонику (кружки) и длительность рассчитанного спектрально-ограниченного импульса от энергии импульса основной частоты на входе в кристаллы (треугольники); *b* — автокорреляционная функция импульса второй гармоники после временно́й компрессии с длительностью 9 fs по уровню половины интенсивности в предположении sech^2 формы импульса.

импульса второй гармоники. Длительность импульса в предположении формы sech^2 составила 9 fs. Такой импульс был получен при отрицательной дисперсии групповой задержки, вносимой чирпированными зеркалами, равной $-600\,\mathrm{fs}^2$. Данная величина согласуется с расчетным значением дисперсии, необходимой для компрессии импульса длительностью 200 fs до 7.5 fs. Превышение измеренной длительности импульса над расчетной мы связываем с неполной компенсацией чирпа импульса зеркалами с отрицательной дисперсией.

Следует также отметить, что расходимость светового пучка второй гармоники была близка к дифракционной. Величина M^2 не превышала 1.2.

Таким образом, использование схемы с двумя кристаллами KDP позволяет достичь высокой эффективности преобразования широкополосного чирпированного импульса 45–50 % и получить после временно́й компрессии импульсы с длительностью менее 10 fs в широком диапазоне энергий импульсов иттербиевого лазера.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] Л.Л. Лосев, В.С. Пазюк, Письма в ЖТФ, **51** (3), 50 (2025). DOI: 10.61011/PJTF.2025.03.59822.20096 [L.L. Losev, V.S. Pazyuk, Tech. Phys. Lett., **51** (2), 48 (2025) DOI: 10.61011/TPL.2025.02.60630.20096].

[2] M. Nisoli, S. De Silvestri, S. Svelto, Appl. Phys. Lett., **68** (20), 2793 (1996). DOI: 10.1063/1.116609

[3] А.В. Конященко, П.В. Кострюков, Л.Л. Лосев, С.Ю. Теняков, Квантовая электроника, **41** (11), 989 (2011). [A.V. Konyashchenko, P.V. Kostryukov, L.L. Losev, S.Yu. Tenyakov, Quantum Electron., **41** (11), 989 (2011). DOI: 10.1070/QE2011v041n11ABEH014700].

[4] N.V. Didenko, A.V. Konyashchenko, L.L. Losev, V.S. Pazyuk, S.Yu. Tenyakov, Opt. Commun., **282** (5), 997 (2009). DOI: 10.1016/j.optcom.2008.11.010M

[5] S. Webb, D. Eimerl, S.P. Velsko, J. Opt. Soc. Am. B, **9** (7), 1118 (1992). DOI: 10.1364/JOSAB.9.001118

[6] S.Yu. Mironov, V.V. Lozhkarev, V.N. Ginzburg, I.V. Yakovlev, G. Luchinin, A. Shaykin, E.A. Khazanov, A. Babin, E. Novikov, S. Fadeev, A.M. Sergeev, G.A. Mourou, IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., **18** (1), 7 (2012). DOI: 10.1109/JSTQE.2010.2071375

[7] M. Brown, Opt. Lett., **23** (20), 1591 (1998). DOI: 10.1364/OL.23.001591

[8] Ф. Цернике, Дж. Мидвинтер, *Прикладная нелинейная оптика* (Мир, М., 1976). [F. Zernike, J.E. Midwinter, *Applied nonlinear optics* (John Willey & Sons, London, 1973).].