

Источник терагерцевого излучения с напряженностью электрического поля свыше 1 МВ/см на основе фемтосекундного хром-форстеритового лазера с частотой следования импульсов 100 Гц

А.В.Овчинников, О.В.Чефонов, Д.С.Ситников, И.В.Ильина, С.И.Ашитков, М.Б.Агранат

Разработан источник терагерцевого (ТГц) излучения в спектральном диапазоне 0.5–2.5 ТГц с частотой следования импульсов 100 Гц. Генерация ТГц излучения основана на оптическом выпрямлении фемтосекундных импульсов излучения хром-форстеритовой лазерной системы в нелинейном органическом кристалле ОН1. Разработана оптическая схема многопроходного усилителя для увеличения энергии импульсов хром-форстеритовой лазерной системы до 2.2 мДж. Эффективность преобразования излучения лазера накачки на длине волны 1.24 мкм в ТГц излучение составила 2%. При фокусировке ТГц пучка в пятно с диаметром, близким к дифракционному пределу, достигнута напряженность электрического поля до 3.5 МВ/см.

Ключевые слова: многопроходный усилитель, фемтосекундный лазерный импульс, оптическое выпрямление, терагерцевое излучение.

1. Введение

В настоящее время существуют несколько лазерных методов генерации терагерцевого (ТГц) излучения в области спектра 0.5 – 10 ТГц, которые могут использоваться для получения импульсов с большой энергией [1]; при фокусировке такого излучения могут быть достигнуты высокие напряженности электрического поля. Одним из методов генерации импульсов ТГц излучения пикосекундной длительности является оптическое выпрямление фемтосекундных лазерных импульсов с наклонным волновым фронтом. Этот метод эффективен для генерации импульсов с большой энергией как без охлаждения кристалла LiNbO_3 [2, 3], так и с его криогенным охлаждением [4, 5]. В частности в работе [3] была получена эффективность преобразования лазерного излучения в терагерцевое $\sim 10^{-3}$, а при фокусировке ТГц излучения на частоте 1 ТГц в пятно диаметром ~ 300 мкм достигнута напряженность поля 1.2 МВ/см. В работе [4] продемонстрировано увеличение эффективности преобразования лазерного излучения в терагерцевое при охлаждении кристалла LiNbO_3 , а в [5] получены импульсы с энергией 45 мкДж и оценена возможность достижения напряженности электрического поля 2 МВ/см при генерации излучения с центральной частотой 0.4 ТГц. В работе [6] была получена энергия импульса ТГц излучения 186 мкДж с центральной частотой генерации 0.25 ТГц при охлаждении кристалла LiNbO_3 до температуры 23 К; напряженность электрического поля достигала ~ 0.7 МВ/см. Так как спектр ТГц излучения, генерируемого в кристалле LiNbO_3 , находится, в основном, в спектральной области ниже 1.5 ТГц,

то получить высокие напряженности электрического поля затруднительно вследствие относительно большого диаметра сфокусированного пучка, определяемого длиной волны излучения. Кроме того, дополнительные трудности при фокусировке возникают из-за различной расходимости пучка ТГц излучения в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Для компенсации такой расходимости ТГц излучения используются специальные оптические схемы накачки кристалла LiNbO_3 , а также фокусировки ТГц излучения [7].

Терагерцевое излучение, получаемое при формировании лазерной плазмы [8–11], позволяет генерировать импульсы с энергией до нескольких микроджоулей в частотном диапазоне 1–100 ТГц, но достижение более высоких энергий импульса представляется очень трудной задачей вследствие нестабильности плазмы. Источники ТГц излучения, основанные на ускорителях электронов, позволяют получать импульсы с энергией более 100 мкДж и напряженностью электрического поля до 20 МВ/см в частотном диапазоне свыше 10 ТГц [12]. Недостатками таких источников является низкая частота следования ТГц импульсов и сложность синхронизации ускорителя электронов с внешним оптическим лазером, что создает некоторые проблемы при проведении экспериментов с временным разрешением (pump-probe эксперименты). Метод генерации разностных частот также достаточно широко применяется для получения ТГц излучения в спектральном диапазоне 1–10 ТГц. При этом используются кристаллы с большим коэффициентом нелинейности второго порядка, например LiNbO_3 . Однако получение высокой эффективности преобразования лазерного излучения в терагерцевое затрудняется сложностью достижения фазового синхронизма между излучением накачки и генерируемым ТГц излучением [13].

Одним из эффективных способов генерации импульсов ТГц излучения с большой энергией методом оптического выпрямления является использование нелинейных органических кристаллов при накачке фемтосекундными

А.В.Овчинников, О.В.Чефонов, Д.С.Ситников, И.В.Ильина, С.И.Ашитков, М.Б.Агранат. Объединенный институт высоких температур РАН, Россия, 125412 Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2; e-mail: ovtch2006@yandex.ru

импульсами от хром-форстеритовой лазерной системы [14–16]. С использованием такой лазерной накачки были получены импульсы с энергией до 900 мкДж [14], продемонстрирована генерация широкополосного ТГц излучения в кристаллах ОН1, DAST и DSTMS [15] и генерация узкополосного ТГц излучения в кристалле ОН1 с перестраиваемой центральной частотой [16] и высокой (до 3%) эффективностью преобразования. Использование хром-форстеритовой лазерной системы с длиной волны излучения $\lambda = 1.24$ мкм позволяет получить значительно более однородное пространственное распределение пучка [15], чем при использовании оптического параметрического усилителя [17]. Однородное пространственное распределение дает возможность значительно улучшить фокусировку пучка ТГц излучения. Однако источник ТГц излучения, накачка которого осуществлялась хром-форстеритовой лазерной системой, работал с частотой следования импульсов 10 Гц, и при использовании такого источника для экспериментальных исследований отношение сигнал/шум оказывалось значительно ниже, чем в случае оптического параметрического усилителя, работающего с частотой 100 Гц или 1 кГц.

Для получения излучения накачки с однородным пространственным распределением, которое в нелинейных органических кристаллах с высокой эффективностью преобразуется в излучение в ТГц области спектра, в работе [18] был предложен метод вынужденного комбинационного рассеяния излучения титан-сапфировой лазерной системы в газе, позволивший получить фемтосекундные импульсы с центральной длиной волны 1.28 мкм и частотой следования 100 Гц, однако результаты использования такого излучения для генерации ТГц импульсов пока отсутствуют.

Наиболее простым и перспективным способом получения излучения накачки для генерации ТГц импульсов в нелинейных органических кристаллах является создание многопроходного усилителя для хром-форстеритовой лазерной системы, работающего с частотой следования импульсов 100 Гц или выше. Несмотря на довольно низкий коэффициент усиления активной среды из хром-форстерита по сравнению с активной средой из титан-сапфира, в работе [19] была показана возможность получения фемтосекундных импульсов с энергией до 90 мДж и частотой следования 10 Гц, а в [20] представлены результаты по генерации фемтосекундных импульсов с энергией 1 мДж и частотой следования до 50 Гц. В этой работе для получения импульсов с большой энергией использовался многопроходный усилитель с оптической схемой со сферическими зеркалами. Недостатком предложенной схемы является фиксированный размер лазерного пучка в активной среде, что не позволяет достичь больших энергий импульса.

Таким образом, задача генерации импульсов ТГц излучения с высокой эффективностью преобразования и большой энергией, а также с однородным пространственным распределением и высокой частотой следования на данный момент остается актуальной.

В настоящей работе представлены результаты экспериментов по генерации импульсов ТГц излучения с большой энергией и частотой следования 100 Гц с помощью оптического выпрямления фемтосекундных импульсов хром-форстеритовой лазерной системы с $\lambda = 1.24$ мкм в нелинейном органическом кристалле ОН1 с высокой эффективностью преобразования. Для достижения требуемых плотностей энергии импульсов такой системы была

разработана и реализована схема многопроходного лазерного усилителя (МЛУ), не имеющая принципиальных ограничений на энергию импульса. Продемонстрирована возможность использования одного лазера для накачки как активной среды регенеративного усилителя (РУ), так и активного элемента МЛУ.

2. Многопроходный лазерный усилитель

Для накачки МЛУ использовалось излучение хром-форстеритовой фемтосекундной лазерной системы («Авеста-Проект», Россия), работающей по схеме усиления чирпированных импульсов и состоящей из задающего генератора, стретчера, регенеративного усилителя и временного компрессора. Лазерная система позволяла получать на выходе импульсы с длительностью 95 фс, энергией 350 мкДж и частотой следования 100 Гц. Накачка РУ осуществлялась излучением импульсно-периодического Nd:YAG-лазера (LQ629-100 Solar LS) с $\lambda = 1.064$ мкм, работающего в режиме модуляции добротности с энергией импульса 200 мДж и его длительностью 10 нс. Особенностью предлагаемой схемы МЛУ являлась возможность использования одного лазера с одним выходным оптическим импульсом для накачки как активной среды РУ, так и активного элемента МЛУ. Это обусловлено тем, что для накачки активной среды РУ необходима энергия не более 30 мДж, а для накачки активной среды МЛУ – не более 170 мДж. Для эффективного усиления чирпированного лазерного импульса необходимо, чтобы оптический импульс накачки поглощался в активной среде непосредственно перед прохождением усиливаемого сигнала, т. к. в этом случае инверсия населенностей в активной среде максимальна, а коэффициент усиления прямо пропорционален инверсной населенности. При использовании одного лазера для накачки РУ и МЛУ оптимальные условия для усиления создаются только в активной среде РУ, т. к. чирпированный импульс на $\lambda = 1.24$ мкм приходит в МЛУ только через ~ 500 нс (время усиления чирпированного импульса в РУ). За это время вследствие конечного времени жизни верхнего лазерного уровня (~ 3 мкс [21]) инверсная населенность в активной среде МЛУ уменьшается, а следовательно, уменьшается коэффициент усиления.

В экспериментах по исследованию параметров усиления МЛУ активным элементом служил хром-форстерит, вырезанный в виде параллелепипеда с размерами $20 \times 5 \times 5$ мм вдоль кристаллографических осей a , b и c соответственно. Излучение накачки было направлено вдоль оси a , а его поляризация – вдоль оси b . Торцы активного элемента имели диэлектрическое покрытие, которое на длине волны 1.24 мкм снижало отражение излучения от каждой поверхности до 0.5%. Длина кристалла выбиралась такой, чтобы поглощение излучения накачки на $\lambda = 1.064$ мкм составляло около 90%, при этом поглощение излучения на $\lambda = 1.24$ мкм не превышало 10%. Измеренные значения соответствовали коэффициенту поглощения излучения накачки $\alpha_{1.06} = 1.15$ см⁻¹ и коэффициенту поглощения излучения на $\lambda = 1.24$ мкм $\alpha_{1.24} = 0.05$ см⁻¹. Таким образом, параметр качества кристалла

$$FOM = \alpha_{1.06}/\alpha_{1.24} \quad (1)$$

был равен 23.

Корпус активного элемента был выполнен из латуни с отверстиями для прокачки охлаждающей жидкости, тем-

пература которой с помощью блока охлаждения поддерживалась равной 18.5 °С.

Для оценки эффективности усиления импульса излучения с $\lambda = 1.24$ мкм в МЛУ с одним лазером накачки с целью создания инверсной населенности в активной среде РУ и МЛУ была измерена зависимость усиления от плотности энергии накачки. Для слабого сигнала усиление определяется следующим выражением:

$$E_{\text{out}} = E_{\text{in}} \exp[(g_0 - \alpha)L], \quad (2)$$

где E_{in} и E_{out} – энергия на входе и выходе активного элемента соответственно; L – длина кристалла; g_0 и α – коэффициенты усиления и поглощения усиливаемого сигнала соответственно.

Для получения более равномерного распределения инверсной населенности в активной среде [22] излучение лазера накачки с помощью диэлектрического зеркала с коэффициентами отражения и пропускания 50% делилось на два пучка и диэлектрическими зеркалами направлялось в активный элемент с двух сторон. Как было показано в работе [22], максимальная плотность энергии излучения накачки, при которой наступает насыщение усиления, составляет ~ 3 Дж/см² (на торце активного элемента). Для обеспечения такой плотности энергии в каждом пучке излучения накачки была установлена положительная линза с фокусным расстоянием 1 м на таком расстоянии от активного элемента, чтобы диаметр пучка на поверхности кристалла составлял 1.6 мм по уровню $1/e^2$. При таком диаметре пучка и энергии падающего на торец кристалла импульса накачки 30 мДж требуемая плотность энергии излучения накачки достигалась в каждом плече. Диаметр пучка излучения на длине волны 1.24 мкм составлял 1 мм по уровню $1/e^2$. На рис.1 приведена экспериментальная зависимость усиления излучения на длине волны 1.24 мкм от плотности энергии накачки. Видно, что максимальное усиление $g_0L = 0.68$, что соответствует увеличению энергии импульса за один проход через активный элемент в 1.96 раза, но вследствие поглощения излучения с длиной волны 1.24 мкм в кристалле увеличение энергии составляет 1.78 раза.

Оптическая схема МЛУ, изображенная на рис.2, состоит из плоских зеркал, которые обеспечивают прохождение импульса излучения с $\lambda = 1.24$ мкм через активный элемент четыре раза. Для обеспечения оптимального размера пучка на всех проходах расходимость излучения на $\lambda = 1.24$ мкм с помощью телескопа 1.25 \times корректировалась таким образом, чтобы с учетом тепловой линзы, воз-

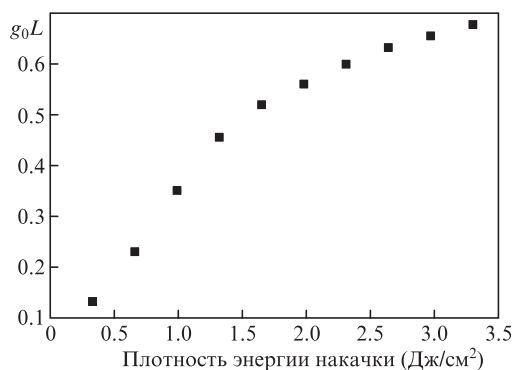


Рис.1. Зависимость усиления активного элемента МЛУ за один проход от плотности энергии накачки.

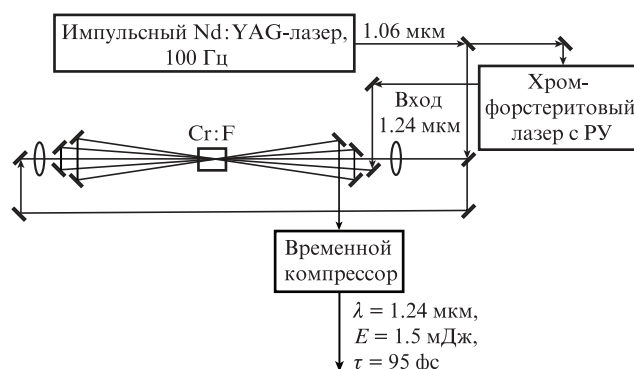


Рис.2. Оптическая схема фемтосекундной хром-форстеритовой лазерной системы с многопроходным лазерным усилителем.

никающей в активной среде при поглощении излучения накачки, плотность энергии излучения к четвертому проходу была близка к плотности энергии насыщения. В этом случае нестабильность энергии импульса накачки значительно меньше отражается на стабильности выходной энергии хром-форстеритового лазера.

Для определения оптимального числа проходов были проведены измерения коэффициента усиления активного элемента g_0 и энергии импульса после каждого прохода (табл.1).

Табл.1.

Номер прохода	Энергия (мДж)	Коэффициент усиления (см ⁻¹)
1	0.91	0.34
2	1.35	0.25
3	1.8	0.19
4	2.2	0.12

Как видно из табл.1, к четвертому проходу коэффициент усиления уменьшается почти в три раза и составляет 0.12 см⁻¹, а энергия импульса на выходе МЛУ достигает 2.2 мДж; при дальнейшем увеличении числа проходов энергия импульса увеличивается незначительно.

После усиления в МЛУ импульс излучения сжимался временным компрессором, перед которым был установлен телескоп 4 \times , увеличивающий диаметр лазерного пучка до 5 мм, чтобы обеспечить плотность энергии на дифракционной решетке менее 100 мДж/см² (порог разрушения покрытия дифракционной решетки), а также корректирующий расходимость. Эффективность временного компрессора, собранного по схеме с одной дифракционной решеткой, составляла $\sim 70\%$, а энергия фемтосекундного импульса достигала 1.5 ± 0.05 мДж. На рис.3 представлены измерения автокорреляционной функции фемтосекундного лазерного импульса, соответствующая длительности импульса 95 ± 5 фс по уровню 0.5 от максимума интенсивности, и спектр импульса.

3. Генерация терагерцевого излучения в нелинейном органическом кристалле

Для генерации импульсов ТГц излучения с частотой следования 100 Гц использовался метод оптического выпрямления фемтосекундных импульсов хром-форстеритовой лазерной системы в нелинейном органическом кристалле ОН1 ((2-(3-(4-Hydroxystyryl)-5,5-dimethylcyclo-

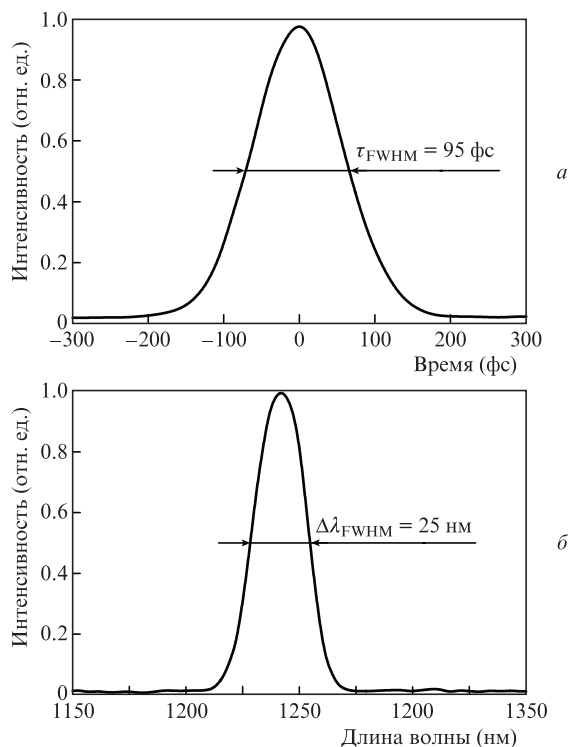


Рис.3. Автокорреляционная функция фемтосекундного импульса хром-форстеритовой лазерной системы с МЛУ (а) и спектр фемтосекундного лазерного импульса (б).

hex-2-enylidene)malononitrile). Схема экспериментальной установки для генерации ТГц излучения представлена на рис.4.

Излучение хром-форстеритовой лазерной системы с $\lambda = 1.24$ мкм направлялось на кристалл ОН1 диаметром 4 мм и толщиной 420 ± 10 мкм (Rainbow Photonics, Швейцария). За органическим кристаллом был установлен ТГц фильтр LPF8.8-47 (Тидекс, Россия), который не пропускал излучение лазерной накачки. Терагерцевый ослабитель использовался для уменьшения энергии излучения при измерениях параметров ТГц импульса. С целью определения оптимальной плотности энергии накачки ТГц кристалла были измерены зависимости эффективности преобразования ТГц излучения и энергии импульса от плотности энергии накачки (рис.5). В экспериментах энергия ТГц импульса измерялась с помощью калиброванной ячейки Голя (оптоакустический детектор GC-1D, Тидекс).

Из рис.5 видно, что максимальная эффективность преобразования составляет $\sim 2.1\%$ и достигается при плотности энергии накачки $6-7$ мДж/см², оставаясь почти неизменной при ее больших значениях, а энергия ТГц импульса увеличивается практически линейно до максимальной плотности энергии накачки (в данной экспериментальной установке – 12 мДж/см²). При этом максимальная энергия импульса ТГц излучения достигает 30 мкДж.

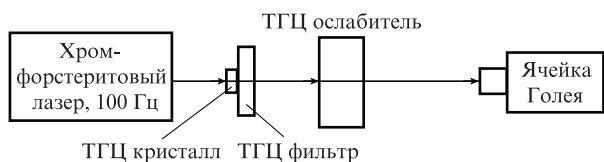


Рис.4. Экспериментальная схема для генерации ТГц излучения.

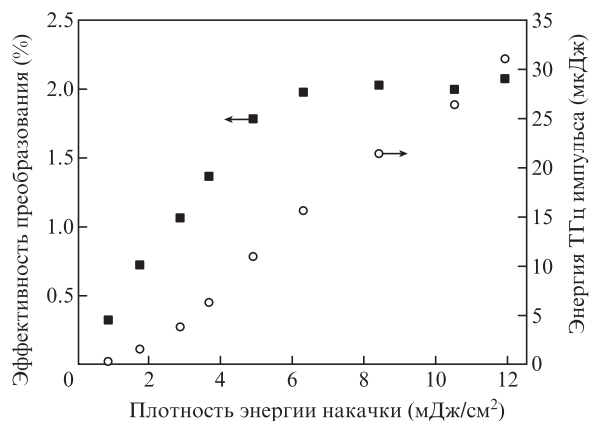


Рис.5. Зависимости эффективности преобразования и энергии импульса ТГц излучения в кристалле ОН1 от плотности энергии накачки.

Необходимо отметить, что повреждение органического кристалла ОН1 происходит при плотности энергии лазерного импульса накачки свыше 25 мДж/см². Таким образом, используемый в экспериментах образец органического кристалла ОН1 позволяет получить при большей плотности энергии излучения накачки еще большую энергию импульса.

Использование коллимированного лазерного пучка для генерации ТГц излучения в нелинейных органических кристаллах делает возможным получение симметричного пространственного распределения интенсивности, что позволяет хорошо фокусировать излучение и достигать больших напряженностей электрического поля. В экспериментах при фокусировке излучения внеосевым параболическим зеркалом с фокусным расстоянием 50.8 мм радиус ТГц пучка, измеренный с помощью «ножевого» метода [23], составил 410 мкм по уровню $1/e^2$ от максимума интенсивности. Для достижения минимального размера пятна при фокусировке ТГц пучок расширился с помощью телескопа, состоящего из двух внеосевых параболических зеркал с фокусными расстояниями 15 и 152.4 мм, который увеличивал диаметр пучка с 4 до 40 мм.

Для определения спектра ТГц излучения были выполнены измерения волновой формы импульса методом электрооптического детектирования. В качестве электрооптического кристалла использовался полупроводник GaP (110) толщиной 200 мкм, а в качестве зондирующего излучения – импульс с длиной волны 1.24 мкм. На рис.6 представлена волновая форма ТГц импульса и соответствующий ей спектр. Длительность импульса по уровню 0.5 от максимума составляет ~ 0.5 пс, спектр излучения находится в диапазоне $0.3 - 2.5$ ТГц. Для предотвращения поглощения излучения парами воды все экспериментальные измерения параметров ТГц импульса проводились в корпусе с сухим воздухом (относительная влажность менее 1.5%).

Напряженность электрического поля в фокальной плоскости фокусирующей параболы определялась из измерений энергии ТГц импульса, размера пучка в фокусе и длительности импульса [24] и достигала 3.5 МВ/см.

4. Заключение

В работе продемонстрирована генерация однопериодных импульсов ТГц излучения с высокой эффективностью

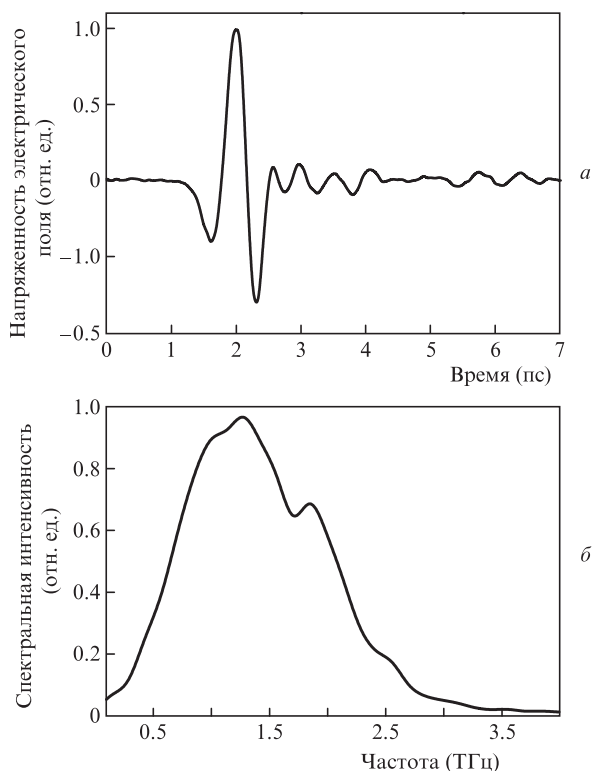


Рис.6. Временная форма (а) и спектр (б) ТГц импульса.

в спектральном диапазоне 0.3 – 2.5 ТГц и частотой следования 100 Гц с помощью метода оптического выпрямления фемтосекундных импульсов хром-форстеритовой лазерной системы в нелинейном органическом кристалле ОН1. Эффективность преобразования лазерного излучения накачки в излучение в ТГц области спектра составляла ~2.1%, энергия в импульсе достигала 30 мкДж. При фокусировке пучка излучения напряженность электрического поля ТГц импульса была равна 3.5 МВ/см. При использовании других органических кристаллов, таких как DAST или DSTMS, спектральный диапазон генерации ТГц источника может быть увеличен до 6 ТГц [15].

Предложена относительно простая оптическая схема усиления импульсов хром-форстеритовой лазерной системы, работающая с частотой следования импульсов 100 Гц. Преимуществом данной оптической схемы относительно других схем и методов является возможность использования ее для достижения больших энергий при соответствующей энергии лазерной накачки и размерах активного элемента.

Эксперименты проведены с использованием оборудования, входящего в состав ЦКП «Лазерный фемтосекундный комплекс» ОИВТ РАН.

1. Гарнов С.В., Щербаков И.А. *УФН*, **181**, 97 (2011).
2. Yeh K.L., Hoffmann M.C., Hebling J., Nelson K.A. *Appl. Phys. Lett.*, **90**, 171121 (2007).
3. Hirori H., Doi A., Blanchard F., Tanaka K. *Appl. Phys. Lett.*, **98**, 091106 (2011).
4. Huang S.W., Granados E., Huang W.R., Hong K.H., Zapata L.E., Kaertner F.X. *Opt. Lett.*, **38**, 796 (2013).
5. Vicario C., Monoszlai B., Lombosi C., Marezko A., Courjaud A., Fülöp J.A., Hauri C.P. *Opt. Lett.*, **38**, 5373 (2013).
6. Fülöp J.A., Ollmann Z., Lombosi Cs., Skrobol C., Klingebiel S., Pálfalvi L., Krausz F., Karsch S., Hebling J. *Opt. Express*, **22**, 20155 (2014).
7. Kunitski M., Richter M., Thomson M.D., Vredenburg A., Wu J., Jahnke T., Schöffler M., Schmidt-Böcking H., Roskos H.G., Dörner R. *Opt. Express*, **21**, 6826 (2013).
8. Чижов П.А., Волков П.В., Букин В.В., Ушаков А.А., Гарнов С.В., Савельев А.Б. *Квантовая электроника*, **43** (4), 347 (2013) [*Quantum Electron.*, **43** (4), 347 (2013)].
9. Cook D.J., Hochstrasser R.M. *Opt. Lett.*, **25**, 1210 (2000).
10. Kim K.Y., Taylor A.J., Glowina J.H., Rodrigues G. *Nat. Photon.*, **2**, 605 (2008).
11. Flanchard F., Sharma G., Ropagnol X., Razzari L., Morandotti R., Ozaki T. *Opt. Express*, **17**, 6044 (2009).
12. Darancian D., Goodfellow J., Fuchs M., Wen H., Ghimire S., Reis D.A., Loos H., Fisher A.S., Lindenberg A.M. *Appl. Phys. Lett.*, **99**, 141117 (2011).
13. Ge Y., Cao J., Shen Z., Zheng Y., Chen X., Wan W. *J. Opt. Soc. Am. B*, **31**, 1533 (2014).
14. Vicario C., Ovchinnikov A.V., Ashitkov S.I., Agranat M.B., Fortov V.E., Hauri C.P. *Opt. Lett.*, **39**, 6632 (2014).
15. Vicario C., Jazbinsek M., Ovchinnikov A.V., Chefonov O.V., Ashitkov S.I., Agranat M.B., Hauri C.P. *Opt. Express*, **23**, 4573 (2015).
16. Овчинников А.В., Чефонов О.В., Молчанов В.Я., Юшков К.Б., Викарио К., Хаури К. *Квантовая электроника*, **46** (12), 1149 (2016) [*Quantum Electron.*, **46** (12), 1149 (2016)].
17. Shalaby M., Hauri C.P. *Nat. Comm.*, **6**, 5976 (2015).
18. Vicario C., Shalaby M., Konyashchenko A., Losev L., Hauri C.P. *Opt. Lett.*, **41**, 4719 (2016).
19. Агранат М.Б., Ашитков С.И., Иванов А.А., Конященко А.В., Овчинников А.В., Фортов В.Е. *Квантовая электроника*, **34** (6), 506 (2004) [*Quantum Electron.*, **34** (6), 506 (2004)].
20. Gordienko V.M., Ivanov A.A., Podshivalov A.A., Savel'ev A.B., Rakov E. V. *Laser Phys.*, **16** (3), 427 (2006).
21. McKinnie I.T., Gloster W.L.A., Jiang Z.X., King T.A. *Appl. Opt.*, **35**, 4159 (1996).
22. Овчинников А.В., Ашитков С.И., Агранат М.Б., Ситников Д.С. *Квантовая электроника*, **38**, 325 (2008) [*Quantum Electron.*, **38**, 325 (2008)].
23. Khosrofi J.M., Garetz V.A. *Appl. Opt.*, **22**, 3406 (1983).
24. Chefonov O.V., Ovchinnikov A.V., Romashevskiy S.A., Chai X., Ozaki T., Savel'ev A.B., Agranat M.B., Fortov V.E. *Opt. Lett.*, **42**, 4889 (2017).